



**Titre:** Nouveau modèle pour le positionnement des senseurs avec  
contraintes de localisation

**Auteur:** Fatima Mourchid

**Date:** 2010

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Mourchid, F. (2010). Nouveau modèle pour le positionnement des senseurs avec  
contraintes de localisation [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de  
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/295/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/295/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:** Steven Chamberland, & Alejandro Quintero  
Advisors:

**Programme:** Génie informatique  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

NOUVEAU MODÈLE POUR LE POSITIONNEMENT DES SENSEURS AVEC  
CONTRAINTES DE LOCALISATION

FATIMA MOURCHID

DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE ET GÉNIE LOGICIEL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE INFORMATIQUE)

AVRIL 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

NOUVEAU MODÈLE POUR LE POSITIONNEMENT DES SENSEURS AVEC  
CONTRAINTES DE LOCALISATION

présenté par : MOURCHID Fatima

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. SAMUEL Pierre, Ph.D., président

M. CHAMBERLAND Steven, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. QUINTERO Alejandro, Doct., membre et codirecteur de recherche

M. PESANT Gilles, Ph.D., membre

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier conjointement mes directeurs de recherche Mr. Steven Chamberland et Mr. Alejandro Quintero pour leurs encadrements efficaces dans la conduite de ce travail.

Ma reconnaissance va aussi aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce mémoire.

Mes remerciements vont également envers le corps professoral de l'École Polytechnique de Montréal pour la qualité de la formation offerte.

Enfin, j'exprime ma gratitude à mes parents ainsi qu'à toutes les personnes d'ici ou du Maroc pour leurs encouragements, leurs patiences et leurs soutiens inconditionnels.

Merci à tous.

## RÉSUMÉ

Les réseaux de capteurs sans fil continuent de constituer sans doute un développement technologique majeur. Le problème de la planification s'inscrit dans un objectif global d'amélioration des performances. Le problème de planification doit permettre d'optimiser l'emplacement des capteurs relativement à des critères afin d'obtenir une certaine qualité de service par exemple en terme de couverture et de connectivité.

L'objectif de ce mémoire est de proposer une stratégie de planification des réseaux de capteurs sans fil. Cette stratégie va permettre de garantir une couverture et une connectivité accrue. L'approche commence par proposer un formalisme combinatoire du problème d'optimisation avec des contraintes qui permettent d'exprimer les objectifs de localisation, de couverture et de connectivité. L'espace de recherche est discret et le choix parmi les sites potentiels est directement lié aux caractéristiques de l'environnement du déploiement. Ainsi, on suppose qu'on connaît les données concernant les coordonnées des positions probables pour mobiles et des sites potentiels, la portée du signal émis, la sensibilité de réception aussi bien des mobiles que des capteurs à installer, le nombre minimal des signaux pour la localisation et le nombre maximal de sauts permis pour le routage entre capteurs. Une heuristique initiale de type glouton et une autre basée sur la recherche avec tabous permettront d'approcher la solution optimale. Cette solution va être comparée à une borne inférieure définie à partir d'une relaxation de certaines contraintes du modèle. Les simulations réalisées ont permis de démontrer la validité de l'approche de planification. Cependant certaines limitations surgissent surtout pour la modélisation de la propagation radio. En effet, nous proposons une amélioration qui se traduit par l'intégration des mesures ou des estimations pour le niveau d'interférence des signaux propagés aussi bien des mobiles que des capteurs. À notre avis, cette approche va essentiellement garantir une localisation exacte des mobiles ainsi qu'une meilleure connectivité des nœuds du réseau de capteurs sans fil.

## ABSTRACT

Wireless sensor networks continue to be without doubts a major research area. The objective of the wireless sensors network planning problem is to locate the sensors while respecting a set of performance constraints. In this work we consider coverage and connectivity constraints. Moreover we impose that each mobile station be located by the sensors (i.e. location constraints).

The purpose of this work is to propose a planning strategy of wireless sensor networks. It will ensure full coverage and increased connectivity. The approach begins by proposing a formalism of combinatorial optimization model with coverage, location and connectivity constraints. The search space is discrete and the choice of potential sites is directly related to the environment of deployment characteristics. Thus, we assume known the coordinates of positions for mobile stations and potential sites, the characteristics of radio propagation, the receiver sensitivity for mobiles as well as for sensors to be installed, the minimum number of signals for the location, the maximum hops allowed for routing between sensors. An initial greedy heuristic is proposed as well as search metaheuristic. Solutions found are compared to a lower bound obtained by a relaxed version of the model. The simulations show the validity of the planning approach. However, some limitations arise especially for the modeling of radio propagation. Indeed, we propose an improvement which is reflected in the integration of measures or estimates for the level of interference signals. From our perspective, this approach will essentially guarantee an exact location of mobiles and a better connectivity of the nodes of wireless sensor networks.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT.....	V
TABLE DES MATIÈRES .....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	XI
LISTE DES ANNEXES.....	XV
INTRODUCTION.....	1
Contexte .....	2
Objectifs de la recherche.....	3
Esquisse de la méthodologie .....	3
Plan du mémoire.....	4
CHAPITRE 1    TECHNOLOGIES DES RÉSEAUX DE CAPTEURS ET PROBLÉMATIQUE DE PLANIFICATION .....	5
1.1    Émergence des réseaux de capteurs sans fil.....	5
1.2    Les composantes d'un réseau de capteurs sans fil et des capteurs.....	6
1.3    Applications des réseaux de capteurs sans fil .....	9
1.4    Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil.....	10
1.5    Architecture des réseaux de capteurs sans fil.....	13
1.6    Normes et contexte de réglementation .....	15
1.7    Recherche et défis .....	21

1.8 Conclusion.....	22
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	23
2.1 Le déploiement dans les réseaux de capteurs sans fil .....	23
2.2 Problèmes similaires au problème du positionnement.....	29
2.3 Revue de littérature .....	30
CHAPITRE 3 MODÉLISATION DE LA PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODES DE RÉSOLUTION.....	46
3.1 Introduction .....	46
3.2 Modélisation.....	46
3.3 Complexité et motivation pour les heuristiques.....	52
3.4 Métaheuristiques et recherche avec tabous .....	54
3.5 Résolution du problème du positionnement.....	55
CHAPITRE 4 PLAN D'EXPÉRIENCES, RÉSULTATS ET ANALYSES .....	65
4.1 Implémentation.....	65
4.2 Plan d'expériences .....	68
4.3 Résultats et analyses.....	74
4.4 Conclusion.....	93
CHAPITRE 5 CONCLUSION .....	94
5.1 Synthèse des travaux .....	94
5.2 Limitations des travaux .....	95
5.3 Directions pour les recherches futures .....	95
BIBLIOGRAPHIE .....	97
ANNEXE: LE STANDARD 802.15.4.....	107



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Caractéristiques des technologies ZigBee, Bluetooth et Wi-Fi.....	18
Tableau 4.1 : Caractéristiques ainsi que les coûts des types de capteurs choisis .....	73
Tableau 4.2 : Paramètres du modèle de propagation COST231-Walfish-Ikegami .....	85
Tableau 4.3 : Coût du placement et écart moyen du coût du placement généré par la borne inférieure et l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée .....	92

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Réseau de capteurs.....	7
Figure 1.2: Architecture d'un capteur .....	9
Figure 1.3: Modèle TCP/IP (A) et Modèle en trois dimensions (B) pour les réseaux de capteurs	15
Figure 1.4 : La pile IEEE 802.15.4 et la pile ZigBee .....	19
Figure 2.1 : Schéma de 'couverture garantie' (A) et Schéma de 'connectivité garantie' (B) (Wang, Y., et al., 2008) .....	25
Figure 2.2 : Méthode de tri-latération (A) et Méthode de triangulation (B) .....	28
Figure 2.3 : Propagation des ondes. Modèle à seuil (A) et Propagation réelle (B).....	29
Figure 3.1: Algorithme de l'heuristique initiale.....	57
Figure 3.2: Algorithme de l'heuristique de recherche avec tabous de base .....	60
Figure 3.3: Algorithme de choix du meilleur mouvement .....	61
Figure 3.4: Procédure de recherche avec tabous diversifiée selon le temps de relance .....	63
Figure 3.5: Procédure de recherche avec tabous diversifiée selon le nombre d'itérations sans amélioration.....	64
Figure 4.1 : Entrées et sorties du programme. Générateur d'exemplaires (A), heuristique initiale (B), heuristique de recherche avec tabous de base (C) et diversifiée et programme de calcul de la borne inférieure (D).....	68
Figure 4.2 : Évolution du coût du placement obtenu avec l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels .....	75
Figure 4.3 : Coût du placement pour 250 sites potentiels .....	76
Figure 4.4 : Temps de calcul de l'heuristique initiale pour 250 sites potentiels .....	77
Figure 4.5 : Temps de calcul de l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels .....	78

Figure 4.6 : Temps de calcul de la borne inférieure pour 250 sites potentiels.....	78
Figure 4.7 : Coût du placement obtenu avec l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels.....	79
Figure 4.8 : Temps de calcul de la borne inférieure pour 250 sites potentiels.....	80
Figure 4.9 : Temps de calcul de l'heuristique initiale pour 250 sites potentiels.....	80
Figure 4.10 : Temps de calcul de l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels .....	81
Figure 4.11 : Coût du placement généré par la borne inférieure pour 250 sites potentiels.....	82
Figure 4.12 : Coût du placement généré par l'heuristique initiale pour 250 sites potentiels.....	82
Figure 4.13 : Coût du placement généré par l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels.....	83
Figure 4.14 : Coût du placement pour 250 sites potentiels et 1000 positions.....	83
Figure 4.15 : Coût du placement obtenu avec l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels.....	88
Figure 4.16 : Coût du placement obtenu avec l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels.....	89
Figure 4.17: Coût du placement pour 250 sites potentiels .....	90
Figure 4.18: Répartition des types de capteurs à installer obtenu par l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels .....	91

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

ADC	Analog to digital converter
AGP	Art gallery problem
AODV	Ad hoc on demand distance vector routing
BPP	Basic printing profile
BPSK	Binary phase shift keying
CAP	Contention access period
CCA	Clear channel assessment
CFP	Contention free period
CID	Cluster identifier
CLH	Cluster head
CRC	Cyclic redundancy check
CSMA-CA	Carrier sense multiple access with collision avoidance
DLL	Data link layer
DSR	Dynamic source routing
DSSS	Direct sequence spread spectrum
ED	Energy detection
FCS	Frame check sequence

FFD	Full function devices
FSPL	Free space path loss
FSR	Fisheye state routing
GPS	Global positioning system
GTS	Guaranteed time slots
IARP	Intrazone routing protocol
IERP	Interzone routing protocol
ISM	Industrial scientific medical
ISO	International organization for standardization
KP	Knapsack problem
LOS	Line of sight
LP-WPAN	Low power-wpan
LQI	Link quality indication
LR-WPAN	Low rate-wpan
MAC	Media access control
MCSP-SAP	Mac common part sublayer
MCU	Microcontroller unit
MEMS	Micro-electro-mechanical-systems

MFR	Mac footer
MHR	Mac header
MLME-SAP	Mac layer management entity
MSDU	Mac service data unit
MSK	Minimum shift keying
OLSR	Optimized link state routing
OQPSK	Offset quadrature phase shift keying
OSI	Open systems interconnection
PDA	Personal digital assistant
POS	Personal operating space
PPDU	Phy protocol data unit
RF	Radio frequency
RFD	Reduced-function devices
SDP	Sensor deployment problem
SNSP	Sensor network service platform
SoC	System on chip
SPIN	Sensor protocols for information via negotiation
SSCS	Service-specific convergence sublayer

TinyOS	Tiny operating system
Wi-Fi	Wireless fidelity
WLAN	Wireless local area network
WMAN	Wireless metropolitan area network
WPAN	Wireless personal area networks
WSN	Wireless sensor networks
ZRP	Zone routing protocol

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE: LE STANDARD 802.15.4.....	107
-----------------------------------	-----



## INTRODUCTION

Les réseaux ad hoc sont des réseaux multi-sauts composés de nœuds autonomes sans fil auto-organisés. Les réseaux ad hoc englobent une large gamme de réseaux dont on peut citer les réseaux de capteurs sans fil, ad hoc mobiles, personnels et maillés. Les réseaux de capteurs sans fil sont une technologie émergente issue des progrès réalisés dans différents domaines tels que la miniaturisation des systèmes micro-électro-mécaniques ainsi que les avancées dans les réseaux de communication sans fil et de l'informatique omniprésente ou de l'intelligence ambiante.

Les réseaux de capteurs sans fil offrent des solutions économiquement attrayantes pour la surveillance à distance des environnements complexes citons notamment : le suivi d'écosystèmes, la surveillance de l'état des bâtiments sensibles et des infrastructures critiques auxquels on peut ajouter les réseaux corporels. Ainsi, ces applications sont appelées applications contextuelles, du moment que les informations obtenues permettent de détecter un changement dans l'environnement et, d'y réagir en fonction des spécifications de l'utilisateur.

Les réseaux de capteurs sans fil sont constitués d'un grand nombre d'unités appelées nœuds (ou poussières intelligentes) et communiquent en général selon trois modes : grâce à des lasers ou des infrarouges ou encore des radiofréquences. Chaque nœud est composé de transducteur ou capteur, d'un module de traitement et d'un module de communication. Outre les capteurs, les réseaux de capteurs sans fil possèdent des unités de contrôle : nœuds-puits ou stations de base ou encore collecteurs. Ceux-ci ont plus de ressources matérielles et permettent de collecter, traiter, stocker et communiquer les informations vers l'utilisateur final via Internet ou satellite. Les nœuds sont disséminés à des endroits de la zone de surveillance peu accessibles, et organisés selon une topologie réseau ad hoc fixe ou mobile pour acheminer les informations à une unité de contrôle hors cette zone. De telles topologies qui doivent offrir une dynamique efficace soulèvent beaucoup d'enjeux tels que la régulation de l'investissement de l'espace public, les contraintes inhérentes aux ressources, la localisation, le partage des informations, la sécurité ou

encore le déploiement et la configuration des topologies.

Notre travail vise essentiellement à définir un modèle pour le déploiement des réseaux de capteurs sans fil avec une garantie de couverture, de localisation, de connectivité et de coût minimal de déploiement, basé sur des hypothèses réalistes pour les puissances de transmission des signaux et de leurs atténuations. Comme le problème est NP-difficile nous proposons des heuristiques pour trouver des solutions approximatives. Enfin, des simulations valident la précision du modèle en ce qui concerne la localisation ainsi que la connectivité.

Le présent chapitre décrit le contexte de notre projet et met en évidence les éléments de la problématique puis les objectifs, la spécification de la méthodologie et le plan du mémoire.

## **Contexte**

La demande croissante pour les réseaux ambiants a permis l'intégration des réseaux de capteurs sans fil pour différents domaines résultant ainsi en des applications nouvelles et bien particulières telles que la surveillance environnementale.

Les réseaux de capteurs sont déployés visant une couverture et une connectivité maximale. Chaque nœud construit une vue locale de l'environnement. Par conséquent, la vue globale ou la couverture totale est formée de l'agrégation de plusieurs vues locales.

Le déploiement peut être déterministe ou aléatoire. Dans un scénario déterministe, les capteurs sont posés manuellement et le routage est prédéterminé. Avec un déploiement aléatoire ou non déterministe, les capteurs sont largués à partir d'un avion, nécessitant par conséquent une stratégie de reconfiguration. Les capteurs peuvent être homogènes ou ayant des rôles différents

caractérisant ainsi une architecture hétérogène.

Ainsi, le déploiement des réseaux de capteurs reste un facteur dépendant de l'application dans le sens où cela pourrait affecter grandement la capture et le routage des données et par conséquent les services offerts par ces réseaux.

## **Objectifs de la recherche**

Notre vision est d'étudier les enjeux en amont, relatifs à la planification et au déploiement d'une infrastructure de réseaux de capteurs sans fil performante. À ce titre, le projet propose une technique de positionnement des réseaux de capteurs pour des fins de localisation. Beaucoup d'enjeux seront cernés :

- garantir une couverture de l'environnement de déploiement en localisant les objets,
- assurer une connectivité accrue,
- réduire le coût total du positionnement et
- être efficace lors du passage à l'échelle.

Une évaluation du modèle va permettre d'affirmer la validité et l'efficacité atteinte en terme de la localisation des objets.

## **Esquisse de la méthodologie**

Il s'agit de proposer un modèle mathématique qui modélisera les aspects inhérents au positionnement des capteurs. Un de ces aspects est la minimisation du coût global du déploiement tout en respectant un ensemble de contraintes qui décrivent les caractéristiques de l'environnement ainsi que les capacités matérielles des capteurs. La résolution de ce modèle va permettre d'indiquer les positions des capteurs simples et ceux avec capacité de calcul. Une heuristique basée sur la recherche avec tabous sera développée afin d'approcher des solutions optimales.

La vérification de la qualité des solutions générées par l'heuristique sera faite par l'élaboration d'un plan d'expériences.

## **Plan du mémoire**

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres. L'introduction a permis de mettre en clair le contexte du projet. Le premier chapitre se consacrera aux réseaux de capteurs sans fil. Dans le deuxième chapitre, nous présenterons une synthèse sur le problème du positionnement dans la littérature et dans le chapitre suivant, nous proposerons notre modèle ainsi que l'heuristique développée. Le quatrième chapitre s'attardera sur les expériences, les résultats et les interprétations. Le dernier chapitre sera concluant tout en proposant de nouvelles débouchées de recherche.

## **CHAPITRE 1      TECHNOLOGIES DES RÉSEAUX DE CAPTEURS ET PROBLÉMATIQUE DE PLANIFICATION**

Nous présentons dans ce chapitre les grands principes des réseaux de capteurs, les architectures, ainsi que les principales applications commerciales et celles pour la recherche. Nous nous intéresserons aussi aux nœuds des réseaux de capteurs, leurs composants, et les standards en vigueur. Nous terminons par énumérer certains défis pour la recherche dans ce domaine.

### **1.1 Émergence des réseaux de capteurs sans fil**

Les réseaux de capteurs sans fil constituent un domaine en pleine expansion aux frontières de la recherche dans le domaine des systèmes informatiques, des réseaux de communication et du traitement du signal (Busnel, 2006). Actuellement, nous témoignons de l'impact majeur que les réseaux de capteurs ont introduit sur la vie courante.

Les réseaux de capteurs qui constituent le cœur des technologies ubiquitaires ont introduit le concept de systèmes contextuels qui ont intégré une certaine forme d'intelligence « naturelle » dans notre environnement (Tilak, Abu-Ghazaleh & Heinzelman, 2002). Ce genre de systèmes se caractérise par la détection, l'interprétation, la diffusion et la réaction.

Les réseaux de capteurs sont des réseaux autonomes et spontanés se caractérisant par des concepts d'auto-mécanismes pour leur mise en œuvre. Ces réseaux offrent des solutions économiquement attrayantes pour la surveillance à distance des environnements (Benahmed, 2006). Ils sont déployés en grande densité pour évaluer et agir d'une manière fidèle et en temps réel (Akyildiz, Su & Saubramaniam, 2002). Il s'agit de mesurer des grandeurs physiques issues d'environnements distribués hostiles en termes de température, pression, humidité, etc. L'étendue de la zone à couvrir ainsi que les ressources limitées des capteurs imposent une collaboration et une communication multi-sauts de telle manière que les données recueillies soient partagées pour optimiser l'action à faire selon la requête de l'utilisateur ou la définition du service prévu (Habbani, Romain, El Abbadi & Garda, 2006).

Les clés de succès des réseaux de capteurs sans fil peuvent être résumées dans les offres qu'ils ont réussi à rendre disponible, citons :

- développement de nouvelles applications,
- facilité d'installation, d'exploitation et de maintenance,
- faibles coûts d'opération,
- fiabilité et précision.

Cependant, la conception des réseaux de capteurs fiables imposent certaines contraintes, citons en :

- bande passante limitée,
- ressources énergétiques limitées,
- communications inefficaces (par exemple en diffusion).

## **1.2 Les composantes d'un réseau de capteurs sans fil et des capteurs**

Dans un réseau de capteurs, on fait la distinction suivante (Tilak, Abu-Ghazaleh & Heinzelman, 2002).

- Capteur : le composant physique qui implémente la détection du phénomène à observer ainsi que la transmission de ces mesures.
- Observateur/ application : l'utilisateur final intéressé en l'obtention des informations concernant le phénomène observé. L'observateur envoie des requêtes au réseau et reçoit des réponses. L'utilisateur formule des requêtes sur le phénomène qui peuvent être statiques (données collectées respectant certains modèles préétablis) ou dynamiques. La capture peut être aussi bien statique que dynamique, dépendant de l'application.
- Phénomène : entité observée, analysée et filtrée par le réseau et qui a un intérêt pour l'observateur. Dans le cas où le phénomène se déplace, il est fort recommandé d'avoir des

capteurs mobiles qui peuvent être déterminés selon des contraintes de précision et de consommation de ressources efficace.

- Infrastructure : influencée par les caractéristiques des capteurs et la stratégie de déploiement.

Un réseau de capteurs forme un chemin entre le phénomène et l'observateur. Les protocoles dans un réseau de capteurs ont pour objectif de créer et maintenir ce chemin sous des conditions instables tout en garantissant un niveau d'énergie minimal, un temps de réponse minimal, une haute précision et une tolérance aux fautes accrue. Dans une application basée sur les capteurs, l'utilisateur est intéressé à suivre le comportement du phénomène observé sous certaines conditions de performance, précision et délai. Dans un réseau de capteurs typique, les capteurs collectent des mesures locales et propagent cette information aux autres capteurs et à l'observateur. Les mesures sont sujettes aux précisions de chaque capteur et aussi à la localisation par rapport au phénomène observé.

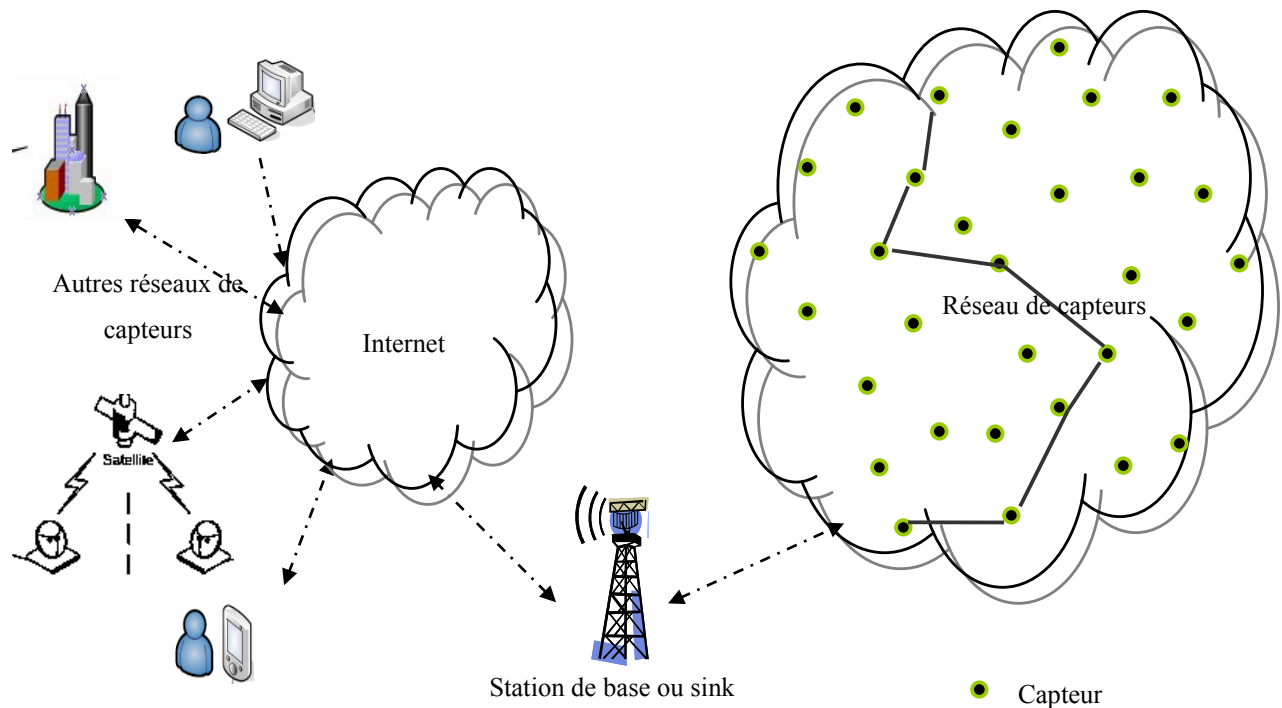


Figure 1.1: Réseau de capteurs

L'architecture des capteurs est composée d'un module central qui communique avec les différentes interfaces d'entrée sortie, de communication et d'alimentation. Un nœud d'un réseau de capteur est formé des modules suivants et qui sont illustrés dans la figure 1.2 (Akyildiz et al., 2002).

- Module de détection. Capteurs qui relient le nœud au monde extérieur. Il est composé de deux unités : capteurs et ADC (Analog to Digital Converter) qui permet de convertir le signal produit par le capteur, sur la base du phénomène observé, en un signal numérique.
- Module de calcul. Il est aussi appelé MCU (MicroController Unit) et il est à la charge du contrôle des capteurs, et des protocoles de communication. Il s'agit d'une carte physique (Mote) qui implémente le système d'exploitation et qui regroupe le processeur et la mémoire.
- Module de communication. Il s'agit d'un système radio à courte portée et peut fonctionner en quatre modes : transmission, réception, libre et veille.
- Module d'énergie. Les nœuds disposent d'une alimentation autonome telle qu'une batterie ou un dispositif qui permet de la recharger à partir de l'énergie ambiante de l'environnement.

Des modules additionnels peuvent être intégrés dans un capteur tels que le sous-système de localisation (GPS : Global Positioning System) ou celui de mobilité.



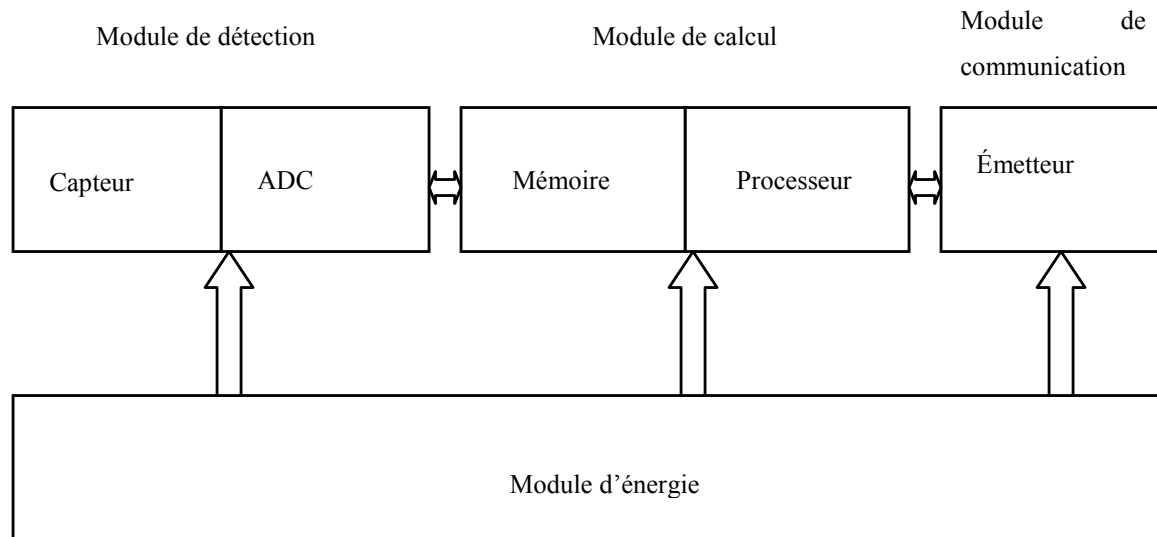


Figure 1.2: Architecture d'un capteur

### 1.3 Applications des réseaux de capteurs sans fil

De nos jours, les réseaux de capteurs trouvent diverses applications dans plusieurs domaines. La mise en réseau des capteurs et des équipements est envisageable afin de répondre aux enjeux de surveillance de l'environnement. Un capteur mis en réseau est capable d'accomplir les fonctions suivantes (Akyildiz et al., 2002).

- La capture : il s'agit de déterminer les valeurs de certains paramètres dépendamment des situations ou encore détecter l'occurrence des phénomènes auxquels on est intéressé et estimer leurs paramètres. elle peut être classée selon ces types :
  - proactive ou surveillance périodique,
  - réactive: réaction à la détection des occurrences des événements ou la réponse à des requêtes de l'utilisateur,
  - hybride : combinaisons des précédents types.
- Le traitement,
- La communication avec d'autres capteurs ou avec la station de base.

Les champs d'utilisation de réseaux de capteurs touchent plusieurs domaines et présentent une efficacité opérationnelle dans différentes applications militaires et civiles (Akyildiz et al., 2004). Ainsi, on peut annoncer une classification des domaines d'applications en cinq familles :

- Applications domotiques : réglage de l'éclairage et de la température par exemple.
- Applications de santé : surveillance médicale telle que l'aide à l'administration des médicaments ou encore les analyses biomédicales à distance etc.
- Applications de suivi d'écosystèmes et de surveillance environnementale : détection de feux de forêt, détection de polluants (dans l'air, l'eau ou le sol), suivi des phénomènes migratoires, etc.
- Applications militaires : contrôle militaire tel que la collecte d'informations sur l'ennemi, surveillance des champs de bataille en ce qui concerne les agents chimiques, par exemple.
- Autres applications commerciales pour la culture et le divertissement par exemple.

#### **1.4 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil**

En contraste avec la technologie réseau filaire ou celle des réseaux ad hoc, les réseaux de capteurs présentent des différences substantielles où le routage se fait par des nœuds dédiés dans le premier cas ou encore où la fiabilité du deuxième dépend de la performance de la technologie sans fil sous-jacente. De plus, des contraintes héritées de la technologie système embarqué des capteurs s'ajoutent à ces considérations (Habbani et al., 2006). Ainsi, la conception des réseaux de capteurs est guidée par plusieurs facteurs qui forment les spécificités de ces réseaux (Akyildiz et al., 2002).

- Contraintes matérielles. Un nœud est constitué des composantes décrites dans la section précédente. Ces composantes sont regroupées dans un module avec des contraintes de miniaturisation. La capacité de calcul faible empêche les traitements complexes. Aussi, la faible longévité des batteries impose une gestion de l'énergie optimale. De plus, les communications se font dans un milieu ouvert (propagation en espace libre) et sont sujettes à des phénomènes électromagnétiques résultant en des débits très faibles. Par

conséquent, la gestion de l'ensemble de ressources des capteurs devient primordiale et une répartition homogène de la charge réseau s'impose (Frye, Cheng, Du & Bigrigg, 2006).

- Densité des nœuds. Le nombre de capteurs est plus élevé que dans un réseau traditionnel qui peut passer de 100 à 1000 nœuds (Akyildiz et al., 2002).
- Hétérogénéité des nœuds. La disparité entre les nœuds dans un réseau de capteurs peut être grande du point de vue performances (Akyildiz et al., 2002). Les nœuds peuvent être fixes ou mobiles installés dans des zones inaccessibles ou dangereuses. Les nœuds peuvent aussi être homogènes ou hétérogènes du point de vue capacité de calcul, de communication et ressources énergétiques par exemple (Hu, Chou, Jha & Bulusu, 2006).
- Environnement. Les nœuds peuvent être déployés à proximité ou à l'intérieur du phénomène observé. Ils peuvent ainsi fonctionner dans des zones distribuées et sous des conditions hostiles en termes de température, pression, humidité, etc. (Akyildiz et al., 2002).
- Topologie dynamique. La gestion de la topologie est impérative en réponse à de possibles défaillances des nœuds et en l'absence d'infrastructure fixe et cela dans le but d'assurer la continuité du service offert par le réseau des capteurs (Frye et al., 2006).
- Communication. Il existe deux types de communications :
  - Centrée-données ou basée-attribut : l'importance est accordée aux données générées par les capteurs. Les requêtes sont envoyées à une région spécifique et dont la position est déduite par l'utilisation des systèmes GPS par exemple.
  - Centrée-adresse ou basée-adresse : les requêtes sont envoyées au nœud concerné.

En général, les communications dans les réseaux de capteurs se font dans le sens ascendant, les nœuds étant les sources d'informations et la station de base, le puits de données.

- Méthodes d'accès au média de communication. Les protocoles MAC servent à organiser l'accès au média de transmission entre les nœuds qui désirent communiquer. Elle peut être:
  - Centralisée. Il s'agit d'élire localement ou pour l'ensemble du réseau un nœud central (Caccamo, Zhang, Sha & Buttazzo, 2002). Un des inconvénients majeurs est la perte de la robustesse dans le cas par exemple de l'épuisement des ressources du nœud central. L'accès au canal peut être fait de deux manières :
    1. un accès garanti par l'assignation d'un intervalle de temps distinct à chaque nœud. Ce type d'accès suppose des caractéristiques matérielles supplémentaires : interfaces radio à plusieurs fréquences, méthodes de synchronisation par GPS, etc.
    2. un accès aléatoire : chaque nœud émet et réémet le message s'il y a eu des erreurs de transmission.
  - Distribuée. L'accès au médium se fait d'une manière aléatoire (Facchinetti, Buttazo, Caccamo & Almeida, 2003).
- Routage. En général, les capteurs ne sont pas identifiés par un numéro d'identification du moment qu'ils sont déployés en grand nombre : l'identité d'un nœud est établie par la position. Ainsi, un nœud communique directement avec les voisins présents dans sa zone de couverture ou encore route l'information jusqu'à la station de base.
- Agrégation de données. Le réseau des capteurs est un ensemble de nœuds coopératifs dépendants. L'une des formes de cette coopération est exprimée par des mécanismes d'agrégation de données. En effet, les données sont collectées par plusieurs capteurs, regroupées et traitées par d'autres capteurs par lesquels transitent ces données avant d'arriver à la station de base (Akyildiz et al., 2004).
- Qualité de service. Dans diverses applications, les données sont soumises à des contraintes temps réel. Cependant, certains types d'applications se focalisent sur la durée de vie du réseau au détriment de la qualité des données (Busnel, 2006).
- Tolérance aux fautes. Certains nœuds peuvent devenir défaillants après un certain temps de fonctionnement. Cependant, les fonctionnalités du réseau doivent être maintenues sans

interruption selon certains degrés de tolérance qui dépend du degré de criticité de l'application (Busnel, 2006).

- Sécurité. Les réseaux de capteurs sont plus vulnérables que les réseaux filaires, mais les contraintes matérielles (capacité de calcul limitée ou encore les caractéristiques de la transmission en milieu ouvert) imposent un contrôle minimal des données.
- Passage à l'échelle ou l'échellonabilité. Dans certaines applications, le nombre de capteurs à déployer varie de 10 à 20. Néanmoins, d'autres applications plus intéressantes demandent le déploiement d'un nombre variant de 100 à 1000 capteurs. Ainsi, le réseau doit assurer le service prévu même avec une densité forte des capteurs et avec un grand nombre d'événements à traiter (Akyildiz et al., 2002).

## **1.5 Architecture des réseaux de capteurs sans fil**

Les réseaux de capteurs sont organisés selon une architecture sans fil à multi-sauts coopérative. Avec le souci de prendre en compte les contraintes inhérentes à ces réseaux, le modèle OSI de l'ISO est généralisé en un modèle en trois dimensions illustré dans la figure suivante, en rajoutant au plan de communication, un plan de gestion et un plan de coordination (Akyildiz et al., 2004).

- Plan de communication. Il s'agit des couches du modèle OSI à savoir : application, transport, réseau, liaison et physique. Cela permet la communication entre les nœuds du réseau. Les données reçues par un nœud sont acheminées au plan de coordination pour décider des actions à faire. Le plan de coordination caractérise les nœuds d'entités « sociales » avec des techniques de coordination et de coopération. Le plan de gestion s'intéresse à la surveillance et au contrôle des nœuds pour un fonctionnement correct, et rend disponible aussi les informations au plan de coordination pour prendre les décisions.
- Plan de gestion. Ses fonctionnalités sont réparties comme suit :
  - couche de gestion de l'énergie : il s'agit de gérer au mieux la consommation de l'énergie. Avant de prendre des décisions, le niveau de l'énergie résiduelle du nœud est envoyé au plan de coordination pour décider de l'éligibilité du nœud à participer à

l'action du réseau. De plus, le plan de gestion informe le plan de coordination dans le cas où un manque d'énergie se produit du moment que certaines actions requièrent d'importantes ressources énergétiques.

- couche de gestion de mobilité : détecte et enregistre les mouvements des nœuds. Ainsi, la connectivité du réseau est toujours maintenue.
  - couche gestion des fautes : s'occupe de la détection et de la résolution des problèmes des nœuds.
- 
- Plan de coordination. Il détermine les actions d'un nœud en réaction aux données reçues du plan de communication et de celui de gestion. Le plan de coordination définit les capacités « sociales » telles que la collaboration et la négociation pour assurer une action cohérente des nœuds du réseau. À la suite de la détection d'un phénomène, les nœuds communiquent entre eux. Pour chaque nœud, ces données sont transférées au plan de coordination pour prendre les décisions adéquates. Ainsi, une coordination entre les nœuds s'opère.

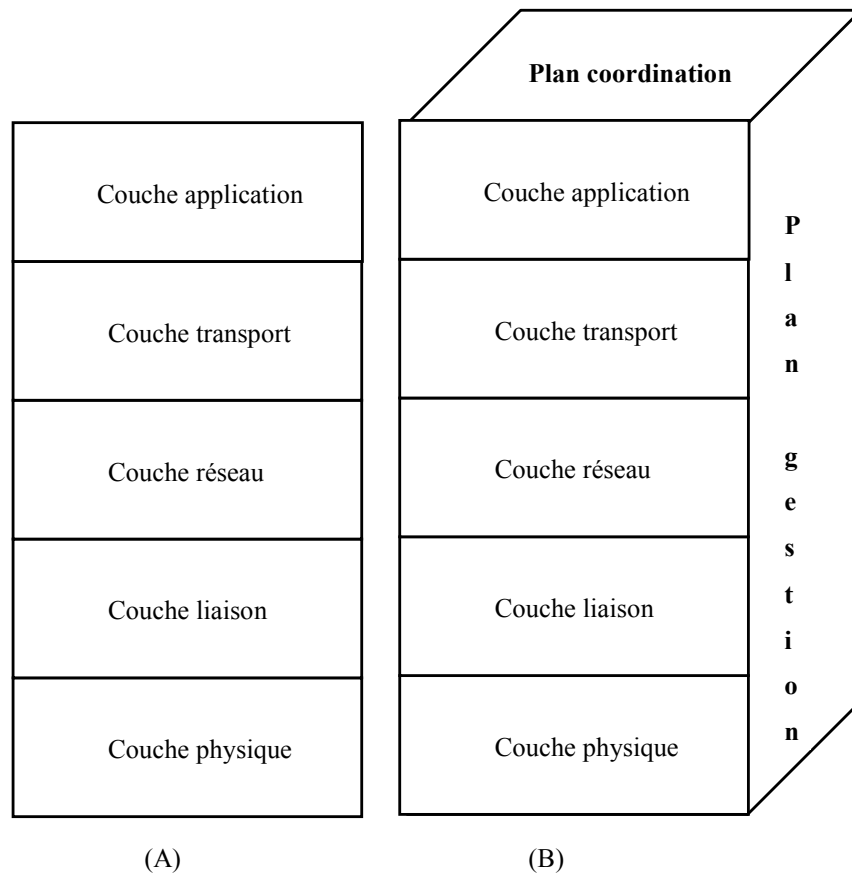


Figure 1.3: Modèle TCP/IP (A) et Modèle en trois dimensions (B) pour les réseaux de capteurs

## 1.6 Normes et contexte de réglementation

Les besoins croissants en terme de communication ont beaucoup changé et désormais, la mobilité et l'ubiquité sont de nouvelles dimensions à prendre en considération. Il existe différents standards pour échanger de l'information par liaison radio et qui se différencient par leurs débits et leurs portées. Ces techniques sont :

- Wireless Personal Area Network (WPAN) : constitué des standards IEEE 802.15 de l'IEEE,
- Wireless Local Area Network (WLAN) : constitué des normes IEEE 802.11x,

- Wireless Metropolitan Area Network (WMAN) : regroupe les standards IEEE802.16 et IEEE 802.20, et
- communications satellitaires.

Les WPAN concernent les réseaux de faibles portées (10-100 m). L'objectif de base ces réseaux est de connecter des périphériques à un ordinateur. Ils sont destinés à des communications entre périphériques engendrant de petits volumes de données (<1Mo) ainsi qu'une faible consommation d'énergie (< 1mA). Les deux principales technologies de WPAN sont :

- Bluetooth ou IEEE 802.15.1. Développé en 1994 et généralisé en 1998 par la création d'un consortium de 2000 acteurs de l'industrie des télécommunications (BlueTooth [BT]). La norme Bluetooth s'appuie sur une pile de protocoles propre. La bande de fréquence utilisée au niveau de la couche radio s'étend de 2,4 GHz à 2,4835 GHz et divisée en 79 canaux de 1 MHz. Le débit offert est de l'ordre de 1 Mb/s. Cette technologie est principalement conçue pour la connexion de périphériques de manière sécurisée.
- ZigBee est un LP-WPAN (Low Power-WPAN) ou encore LR-WPAN (Low Rate-WPAN) basé sur la norme IEEE 802.15.4 de communication à faible consommation et à faible débit (ZigBee Alliance [ZA]). ZigBee a d'abord été dénommé HomeRF-Lite avant de porter successivement FireFly et RF-EasyLink. C'est une spécification publiée en 2003 par l'Alliance ZigBee et complétée en 2006 par la norme IEEE 802.15.4-2006 (version B). Elle propose un système de mise en réseau d'entités embarquées communicantes et présente des débits de 250 Kb/s. La norme définit 27 canaux de communication différents répartis sur trois bandes de fréquences :
  - bande 868 MHz-868.6 MHz, 1 canal, 20 Kb/s - 100 Kb/s en Europe,
  - 902 MHz-928 MHz, 10 canaux, 40 Kb/s - 250 Kb/s aux États-Unis,
  - bande 2,4 GHz-2,48 GHz, 16 canaux, 250 Kb/s partout.



ZigBee s'appuie sur une technique d'étalement de spectre par séquence directe (Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)),

- avec une modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying) pour les bandes de fréquence 868 MHz et 915 MHz
- et une modulation OQPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) pour la gamme 2,4 GHz - 2,48 GHz.

ZigBee est basé sur le protocole d'accès CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). La norme ne définit que les couches MAC (Media Access Control) et physique du modèle OSI. Un nœud ZigBee peut utiliser une adresse IEEE sur 16/64 bits, et peut être mis en réseau selon des topologies évoluées : en étoile, en arbre ou encore maillée. Les réseaux en arbre et maillés sont dotés de :

- nœuds terminaux ZigBee ou Reduced-Function Devices (RFD) qui impliquent une pile de protocoles légère et sont ainsi économiques,
- nœuds routeurs Full Function Devices (FFD) pour transférer des données par multi sauts au destinataire et,
- coordinateur aussi de type FFD qui coordonne l'ensemble des fonctionnalités du réseau.

Ci-après, un tableau récapitulatif des caractéristiques de ces différentes technologies en comparaison avec la technologie Wi-Fi.

Tableau 1.1 : Caractéristiques des technologies ZigBee, Bluetooth et Wi-Fi

<b>Protocole</b>	<b>ZigBee</b>	<b>Bluetooth</b>	<b>Wi-Fi</b>
<b>IEEE</b>	802.15.4	802.15.1	802.11a/b/g
<b>Besoins mémoire</b>	4-32 Kb	> 250 Kb	> 1 Mb
<b>Autonomie avec pile</b>	Années	Jours	Heures
<b>Nombre de nœuds</b>	Milliers	< dix nœuds	Dizaines
<b>Débit</b>	250 Kb/s	1 Mb/s	11-54-108 Mb/s
<b>Portée</b>	100 m	10-100 m	300 m
<b>Fréquence</b>	2,4GHz 868MHz-915MHz	2,45 GHz	2,45GHz- 5 GHz
<b>Bande passante</b>	0,3 MHz 0,6 MHz 2 MHz	1 MHz	20 MHz-25 MHz
<b>Consommation</b>	30 mA en transmission 356 µA en veille	40 mA en transmission 0.2 mA en veille	400+mA en transmission 20 mA en veille
<b>Applications</b>	Surveillance et contrôle	Connectivité des : PC/ téléphones portables/PDA	Internet Réseau sans fil
<b>Points forts</b>	Batterie de longue durée Coût d'opération faible	Interopérabilité	Haut débit

L'Alliance ZigBee est un écosystème mondial d'entreprises (plus de 200 membres) dédié au développement de solutions résidentielles, commerciales et industrielles à faible consommation d'énergie, en réseau sans fil et sur la base d'une norme mondiale ouverte. L'Alliance ZigBee est responsable de fournir une pile de fonctionnement ZigBee de référence. La pile ZigBee est constituée de:

- couche réseau : assure le routage et envoie les paquets reçus soit à un autre nœud ZigBee, soit à la sous-couche de support d'application qui décide à quelle application (un nœud peut contenir plusieurs applications) est destiné le paquet de données. Il est aussi possible d'intégrer un service de sécurité de la transmission des données.
- framework d'applications.

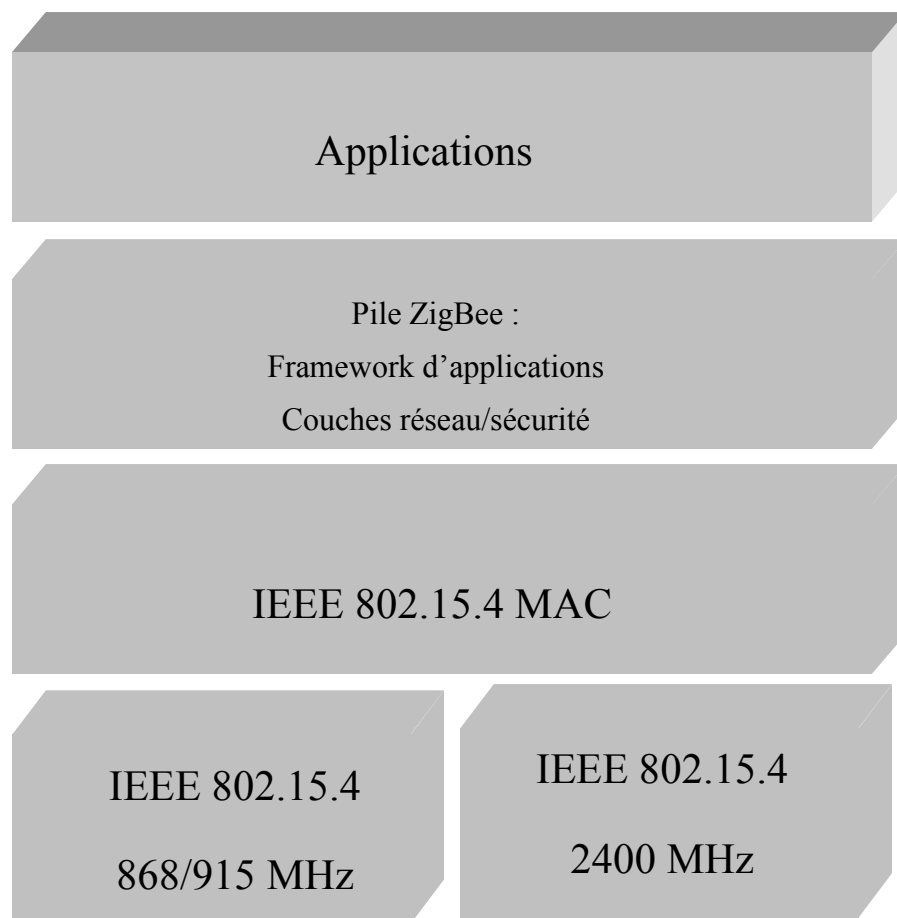


Figure 1.4 : La pile IEEE 802.15.4 et la pile ZigBee

### 1.6.1 Le système d'exploitation TinyOS (Tiny Operating System)

Des chercheurs de l'université de Berkeley ont développé un système d'exploitation intégré et modulaire open source pour les réseaux de capteurs : TinyOS (TinyOs [TinyOs]), écrit en NesC, langage orienté composant syntaxiquement proche du C. La bibliothèque de composants de TinyOS regroupe des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données. Un programme s'exécutant sur TinyOS est constitué d'une sélection de composants systèmes et de composants développés spécifiquement pour l'application à laquelle il sera destiné par exemple : acquisition de température, du taux d'humidité, etc.

TinyOS est un système d'exploitation conçu pour les systèmes à ressources limitées tels que les capteurs. Il est basé sur quatre caractéristiques :

- évènementiel : le fonctionnement d'un système basé sur TinyOS s'appuie sur la gestion des évènements. En effet, l'activation de tâches et leur interruption s'effectuent à l'apparition d'évènements les plus prioritaires.
- non préemptif : TinyOS ne gère pas le mécanisme de préemption entre les tâches en cours mais donne la priorité aux interruptions matérielles.
- pas de temps réel : TinyOS est un système temps réel relâché c'est à dire qu'il ne gère pas des niveaux de priorité des tâches, permettant ainsi de respecter des délais de traitement imposés par l'environnement.
- consommation minimale : TinyOS a été conçu pour optimiser la consommation en énergie du capteur.

Le système TinyOS devenu la norme « de facto » ([TinyOs]), les groupes de recherche ainsi que les fabricants et les industriels le choisissent pour développer et tester des protocoles, des architectures. Ceci est justifié par le fait que TinyOS fournit en plus des outils de développement et de simulation, une solution pour développer des applications répondant aux différentes spécificités et exigences de chacune d'elles.

## 1.7 Recherche et défis

Les réseaux de capteurs sans fil soulèvent beaucoup de défis scientifiques qui ont pour objectif l'optimisation des performances. La recherche s'est développée pour les réseaux de capteurs sans fil d'une manière indépendante dans différents groupes de recherche à travers le monde. Il n'existait pas de "lingua franca" comme c'est le cas pour d'autres domaines de recherche (Handziski, Köpke, Karl & Wolisz, 2003). Une harmonisation des efforts a été et reste un besoin ressenti dans plusieurs aspects et dont on peut en citer les environnements de simulation, les plateformes physiques et les systèmes d'exploitation.

Les principaux travaux de recherche dans ce domaine portent sur la prolongation de la durée de vie du réseau, la configuration de topologies, la localisation des capteurs et des phénomènes à surveiller, le routage, la collaboration entre les nœuds et la sécurité, (Akyildiz et al., 2002).

Un des points critiques dans le design des réseaux de capteurs est de déterminer une stratégie de déploiement. Très tôt, les travaux de recherche se sont intéressés au développement des plateformes et aux paradigmes de la communication. Mais, un déploiement efficace devient impératif pour des réseaux denses pour garantir la couverture et maintenir la connectivité (Jain & Liang, 2005).

Lorsque la sélection des positions des capteurs pour le déploiement est possible, nous parlons de déploiement déterministe et non déterministe dans le cas où les capteurs peuvent être déployés en les larguant par un avion par exemple. Ce genre de déploiement initial ne peut pas être optimal du moment que cela peut résulter en des régions très denses et d'autres moins denses ou même déconnectées. Une autre approche consiste à déployer les capteurs selon une certaine fonction de densité de probabilité de couverture (Wang, Y., Hu & Tseng, 2008). Aussi, la densité des capteurs impose de plus en plus la nécessité de développer des stratégies de déploiement avec une certaine flexibilité pour tenir en compte de la tolérance aux pannes et pour garantir une durée de vie du réseau optimale (Akyildiz et al., 2002 ; Busnel, 2006). De plus, la nature du service prévu détermine les types de capteurs à déployer statiques ou mobiles, homogènes ou ayant des rôles différents caractérisant ainsi une architecture hétérogène (Hu et al., 2006).

Toutefois, un réseau déployé d'une manière optimale peut être perturbé après un certain temps d'opération par des contraintes naturelles ou physiques, et un redéploiement peut être dicté pour remplacer les capteurs défaillants (Frye et al., 2006).

## **1.8 Conclusion**

L'évolution des technologies des réseaux sans fil pour les capteurs, des systèmes embarqués à faible consommation et celle des capteurs intelligents a permis de concevoir sur une même puce tout un système électronique (System on Chip : SoC) composé d'unités d'acquisition, de traitement et de communication, offrant ainsi la perspective d'une excellente extension des applications des systèmes embarqués à des applications pour des réseaux de capteurs sur une grande échelle (Habbani, Romain, El Abbadi & Garda, 2006). Ces applications doivent garantir les concepts de l'informatique omniprésente et orientée contexte.

Nous avons identifié dans ce chapitre les contraintes qui doivent être prises en compte pour la conception de futures architectures des réseaux de capteurs. La section suivante s'attache à présenter les techniques de déploiement existantes afin de pouvoir déterminer le plus à même de satisfaire les besoins d'un réseau de capteurs sans fil. Une revue de littérature exposera les mécanismes de positionnement pour les réseaux de capteurs.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

La miniaturisation des capteurs, combinée avec la convergence des moyens de communication et l'apparition des réseaux ubiquitaires ont offert un nouvel essor pour les réseaux de capteurs sans fil. Un des défis clés concernant les réseaux de capteurs est le déploiement du moment que le déploiement des capteurs est le facteur qui permet une bonne exploitation des données collectées (Dhillon & Chakrabarty, 2003). L'objectif étant de garantir un coût optimal, une qualité de service fournie par une couverture garantie, une tolérance aux pannes, un rapport coût traitement/coût communication acceptable et une gestion des ressources efficace.

### 2.1 Le déploiement dans les réseaux de capteurs sans fil

Le problème de déploiement peut être défini comme suit : étant donné une surface  $A$  2D ou 3D (des obstacles peuvent exister sans partitionner la surface), et un ensemble de capteurs de différents types (différents rayons de détection et rayons de communication), il s'agit de minimiser le nombre de capteurs à mettre en place sur la surface  $A$  pour garantir la couverture de détection ainsi que la connectivité du réseau.

Une région cible est considérée comme couverte si chaque point est couvert sur un rayon de détection  $r_s$  (sensing range) par un capteur actif avec une certaine probabilité de couverture et s'il existe une communication directe ou Line Of Sight (LOS) même en présence d'obstacles. Un réseau de capteurs qui surveille une région cible est totalement connecté si tous les nœuds peuvent acheminer les données par multi-sauts vers la destination ou vers la station de base.

La couverture et la connectivité restent les facteurs qui déterminent l'efficacité de la détection et de la communication respectivement. La couverture est affectée par la sensibilité des capteurs ou le rayon de détection  $r_s$ , alors que la connectivité est garantie par le rayon de communication  $r_c$  (communication range). Une perte modérée de la couverture dans certaines applications des

réseaux de capteurs sans fil est tolérable, tandis que la perte de la connectivité peut être fatale (Frye et al., 2006; Jain & Liang, 2005).

La couverture est définie comme suit : si chaque point de la région est à distance maximale de  $r_s$  par rapport à au moins un capteur alors le réseau garantit une couverture complète. Différents niveaux de couverture peuvent être acceptés dépendamment de l'application. Dans certaines applications critiques, une couverture complète doit être garantie tout le temps et la perte de couverture peut conduire à une défaillance du réseau. Par contre, dans d'autres applications une détérioration de la couverture peut être acceptable. La connectivité quant à elle ajuste la communication des nœuds du réseau. Si un grand nombre de nœuds tombe en panne à cause par exemple d'un manque d'énergie, une partie du réseau devient déconnectée.

Les schémas de couverture décrivent la topologie du réseau de capteurs pour garantir une détection parfaite et optimale tandis que les schémas de connectivité concernent la transmission et la réception de messages dans le réseau. Parmi les schémas de couverture et de connectivité, on trouve :

- schéma de couverture binaire : une région peut être surveillée ou non par un capteur,
- schéma de couverture probabiliste : la couverture n'est pas déterminée par la distance géométrique, d'autres facteurs entrent en jeu comme les conditions de l'environnement, le bruit, l'atténuation du signal et les interférences. Ainsi, le modèle de couverture est probabiliste et une région peut être surveillée par un capteur selon une certaine densité de probabilité (Wu, Rao, Du, Iyengar & Vaishnavi, 2007).
- schéma de couverture hybride : combinaison des 2 schémas précédents. La couverture est garantie jusqu'à une certaine distance où elle devient probabiliste (Wu, Rao, Du, Iyengar & Vaishnavi, 2007).
- schéma de 'couverture garantie' ou Coverage-first : ce schéma de déploiement essaye de réduire le nombre de capteurs en minimisant les intersections ou les chevauchements de couverture. Dans ce schéma les nœuds sont à une distance de  $\sqrt{3}r_s$  et où  $r_s$  est le rayon de



détection. L'efficacité de ce mode déploiement est garantie lorsque  $r_c \geq \sqrt{3}r_s$  et où  $r_c$  est le rayon de communication (Wang, Y., et al., 2008).

- schéma de 'connectivité garantie' ou Connectivity-first : consiste à garantir la connectivité. Les nœuds sont ainsi à une distance égale à  $r_c$ . L'efficacité de ce mode déploiement est garantie lorsque  $r_c \leq \sqrt{3}r_s$  (Wang, Y., et al., 2008).

Zhang & Hou (2003) ont démontré la condition nécessaire et suffisante pour que la couverture implique la connectivité : lorsque la densité des capteurs est finie,  $r_c \geq 2r_s$  est une condition suffisante et nécessaire pour que la couverture implique la connectivité. X.Wang, Xing, Zhang, Lu, Pless and Gill (2003) ont démontré un résultat similaire pour garantir la q-couverture (chaque point de la surface à couvrir doit être couvert par au moins  $q$  capteurs) et la q-connectivité (le graphe qui représente la communication entre capteurs déployés est q-connecté): lorsque  $r_c \geq 2r_s$ , la q-couverture pour une région convexe implique la q-connectivité.

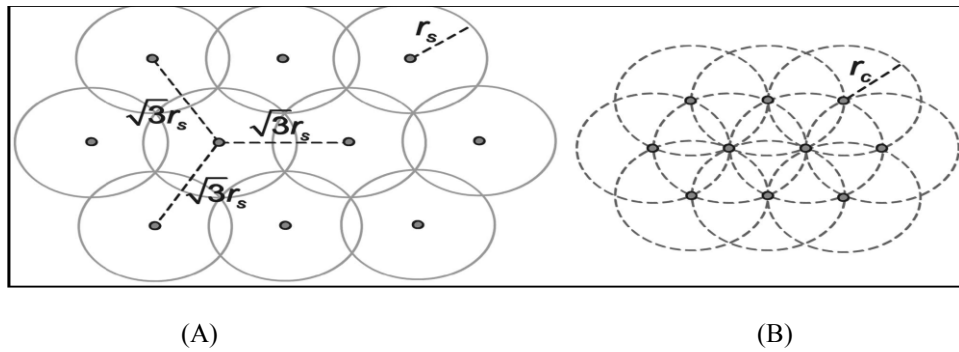


Figure 2.1 : Schéma de 'couverture garantie' (A) et Schéma de 'connectivité garantie' (B) (Wang, Y., et al., 2008)

### 2.1.1 Positionnement, localisation et prédiction de couverture

Le déploiement ou le positionnement pour la localisation d'objets dans un réseau de capteurs passe par l'adoption de méthodes de localisation. Une des méthodes pour déterminer un positionnement efficace est le positionnement basé sur la propagation des ondes pour estimer la

position. Cette méthode mesure une grandeur physique par laquelle la distance peut être estimée. Les distances ou les angles par rapport à un ou plusieurs points de référence ou ancres sont déterminés par l'utilisation des méthodes géométriques. Nous allons rappeler quelques techniques d'estimation de position utilisées par les systèmes de localisation :

- tri-latération : chaque nœud mesure la puissance des signaux ou l'angle d'arrivée du signal qui permet d'estimer les distances par rapport aux nœuds de référence.
- triangulation : permet de déterminer une distance en calculant la longueur de l'un des côtés d'un triangle, et en mesurant deux angles de ce triangle. La position est estimée en fonction des positions des nœuds de référence et de l'angle d'arrivée du signal provenant des nœuds de référence.
- multi-latération : permet de déterminer la position par mesures des distances par rapport à plusieurs points de référence. Elle peut être basée sur géométrie sphérique impliquant l'intersection de sphères correspondant à des mesures de distances ou encore, basée sur géométrie hyperbolique utilisant l'intersection d'hyperboloïdes correspondant à des mesures de différences de distances.
- multi-angulation : il s'agit d'estimer la position en se basant sur un nombre suffisant d'angles par rapport à des points de référence.

Les techniques de tri/multi latération peuvent être :

- locales où une vue locale des positions est établie avec les mesures estimées,
- itératives où à chaque itération les nœuds estiment leurs positions et deviennent à l'itération suivante des nœuds de référence ou encore,
- collaboratives où la diffusion des différentes vues locales, permet de dessiner une vue globale du réseau.

Les techniques d'estimation des positions qu'on vient de présenter sont mises en œuvre par différentes méthodes pour déterminer les distances ou les angles par rapport à des points de référence. Pour déterminer la distance entre deux positions, plusieurs techniques peuvent être employées comme la synchronisation, la puissance de signal reçu, ou l'angle d'arrivée du signal. La puissance du signal reçu dépend des phénomènes électromagnétiques de l'environnement qui décrivent les propriétés spatiales tels que la réflexion, la diffraction ou encore les propriétés temporelles telles que l'évanouissement. D'une manière simpliste, le réseau peut être représenté en un modèle à seuil ou à disque (figure 2.3 (A)) et ainsi décomposé en 3 zones (Gorce, 2007) :

- zone 1 : regroupe les nœuds pour lesquels la communication est parfaite,
- zone 2 : constituée par les nœuds pour lesquels la communication est incertaine,
- et enfin la zone 3 : contient les nœuds pour lesquels la probabilité de communication est nulle.

Mais, dans la réalité, la propagation des ondes impose un modèle pour la communication qui doit refléter les caractéristiques de l'environnement. Ceci nous amène à étudier la propagation et la prédiction de couverture radio et à exposer les familles de modèles qui ont été développées :

- modèles empiriques ou statistiques : il s'agit de modèles statistiques issus de campagnes de mesure. Ils ont été principalement utilisés pour la planification de réseaux cellulaires en environnement ouvert. Ils permettent d'estimer des cartes de couverture mais présentent des erreurs de prédiction dans des environnements fermés. Un exemple qui est le plus largement répandu est le modèle d'Okumura-Hata applicable à la bande de fréquence 100 MHz-1500 MHz. Il donne le champ prévu sous forme de courbes en fonction de la distance émetteur/récepteur pour une série de fréquences et de hauteurs d'antennes de base. Le modèle d'Okumura-Hata a été étendu à la bande de fréquence 1500 MHz-2000 MHz dans le cadre des travaux du COST231 qui ont donné naissance au modèle COST231-Hata. (Seybold, 2005).

- modèles déterministes ou physiques : reposent sur un modèle de propagation géométrique des ondes électromagnétiques. L'utilisation de ces méthodes passe par un compromis entre temps de calcul et précision. Ainsi, pour que la recherche soit rapide, on doit limiter le nombre de rayons et de réflexions pris en compte dans le modèle. De ce fait, la précision de l'estimation est moins bonne.
- modèles semi-empiriques ou mixtes : combinent une modélisation analytique des phénomènes physiques et un ajustement statistique à l'aide de mesures expérimentales. Il s'agit de partir d'un modèle physique et à l'aide de série de mesures, remplacer les résultats des méthodes numériques de l'électromagnétisme par des fonctions analytiques obtenues par des ajustements statistiques des données.

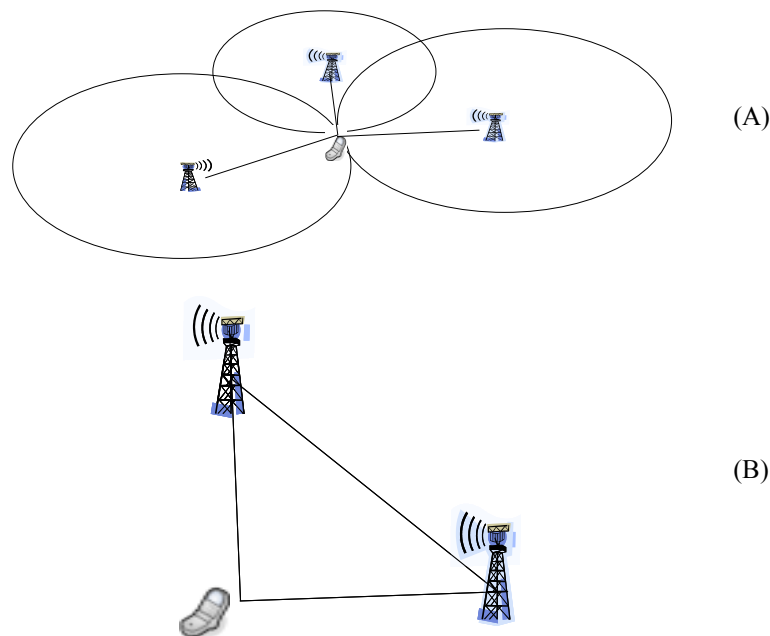


Figure 2.2 : Méthode de tri-latération (A) et Méthode de triangulation (B)

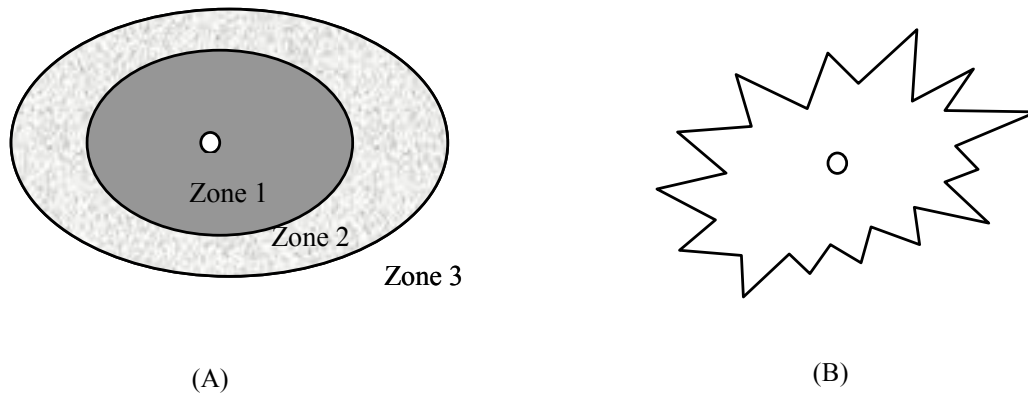


Figure 2.3 : Propagation des ondes. Modèle à seuil (A) et Propagation réelle (B)

## 2.2 Problèmes similaires au problème du positionnement

Un ensemble de problèmes académiques ont une relation étroite avec le problème de déploiement de capteurs. Prenons par exemple, le problème de localisation d'entrepôts qui consiste à mettre en place un ensemble d'entrepôts pour servir un certain nombre de points de demande tout en minimisant les coûts. Le problème  $k$ -center défini par Hakimi en 1964 fait partie des problèmes de localisation d'entrepôts et plus précisément de ceux du type minimax localisation-allocation (Hale & Moberg, 2003). Beaucoup de travaux se sont concentrés pour en étudier différentes versions et aussi en démontrer la complexité. Le problème  $k$ -center définit une fonction objectif qui consiste à minimiser la distance max entre un point de demande et l'entrepôt le plus proche. La version décision de ce problème est celle de déterminer si un ensemble de points de demandes peut être couvert par  $k$  centres à une distance égale à  $r$ . Un autre problème similaire est celui de  $k$ -median. Formulé par Hakimi en 1964, le problème  $k$ -median est l'un des problèmes de type minisum localisation-allocation (Hale & Moberg, 2003). Il s'agit de déterminer  $k$  centres parmi un ensemble de  $n$  centres tels que la somme des distances entre chaque point de demande et le centre le plus proche soit minimale.

Il existe aussi une grande ressemblance entre le problème de positionnement des capteurs et le problème de la galerie d'art ou Art Gallery Problem (AGP). Le problème AGP a été défini par

Klee en 1973, analysé par Chvatal en 1975, et traité par le théorème AGP par O'Rourke en 1987 (Urrutia, 2000). Il s'agit de placer des agents ou des caméras de surveillance dans une galerie d'art représentée par un polygone non convexe de  $n$  sommets de telle manière que chaque point de la galerie soit visible par au moins un agent ou une caméra. Le problème AGP a été résolu pour une surface 2D et a été démontré NP-difficile pour une surface 3D. Différentes variantes du problème AGP ont été étudiées. Une version intéressante du problème AGP est la suivante : après un déploiement initial aléatoire, comment les agents se déplacent pour que chaque point soit visible par au moins un agent, il s'agit ici du problème de déploiement distribué dans une galerie d'art (Distributed Art Gallery Deployment Problem.). Cependant, dans certains problèmes de positionnement, les capteurs peuvent être hétérogènes contrairement au problème AGP où les caméras ont les mêmes caractéristiques.

## 2.3 Revue de littérature

Le déploiement des réseaux de capteurs sans fil vise à garantir une surveillance optimale de la région cible. Le problème du déploiement optimal reste un des points névralgiques qui a fait couler beaucoup d'encre. Dans cette section, nous présentons quelques travaux qui se sont consacrés au déploiement dans les réseaux de capteurs sans fil.

L'article proposé par Türkogullari, Aras, Altinel & Ersoy (2007) définit un programme linéaire mixte (MILP) pour déterminer les types ainsi que l'emplacement des capteurs à déployer. L'objectif étant de positionner les capteurs et de planifier leurs activités pour garantir une durée maximale de fonctionnement du réseau tout en minimisant le coût de déploiement. L'approche proposée vise à déterminer une stratégie optimale de positionnement en définissant un modèle de déploiement avec des contraintes de consommation énergétique. Le problème est formulé comme suit : étant donné un ensemble de points  $j=1...J$  formant une grille et qui doivent être couverts par au minimum  $d_j$  capteurs, un ensemble de points potentiels  $i=1..I$  pour l'installation des capteurs, un ensemble de capteurs  $k=1..K$  avec un rayon de détection  $s_k$ , un taux de consommation d'énergie  $e_k$ , une réserve d'énergie  $E_k$ , un coût d'installation  $c_k$  et un budget de déploiement égal à  $B$ , comment déployer les capteurs pour maximiser la durée de vie du réseau  $L$ . Les auteurs ont développé un modèle mathématique pour déterminer les points de

positionnement des capteurs et les périodes pendant lesquelles les capteurs seront actifs ou en veille dans le but de maximiser la durée de fonctionnement du réseau. Pour des réseaux de grande densité, le modèle proposé ne donne pas de solutions c'est pour cela que les auteurs ont proposé une heuristique basée sur la relaxation Lagrangienne. Les auteurs ont proposé d'éliminer les contraintes de couverture ainsi que celle de coût de déploiement, et les ajouter à la fonction objectif après avoir multiplié chacune d'elles avec des paramètres  $\mu$  et  $\lambda$  (multiplicateurs de Lagrange) respectivement. Cette nouvelle fonction objectif constitue une borne supérieure  $L_{UB}(\mu, \lambda)$  à partir de laquelle, les auteurs déduisent le problème Lagrangien dual suivant :

$$L_{UB}^* = \min_{\mu \geq 0, \lambda \geq 0} L_{UB}(\mu, \lambda)$$

Les auteurs proposent un algorithme sous-gradient pour résoudre le problème Lagrangien dual. Il s'agit de résoudre à chaque itération le problème Lagrangien  $L_{UB}(\mu, \lambda)$  pour des valeurs déterminées de  $\mu$  et  $\lambda$ , transformer une solution non faisable du problème Lagrangien en une solution faisable pour le problème initial avant de mettre à jour les paramètres  $\mu$  et  $\lambda$ .

L'algorithme sous-gradient produit ainsi une borne inférieure pour le problème initial dénotée par  $L_{LB}^*$ . L'algorithme sous-gradient se termine si  $L_{LB}^* = L_{UB}^*$  ou encore si le paramètre  $\theta$  (qui indique le nombre d'itérations sans amélioration de la valeur de  $L_{UB}$  et dont la valeur initiale est égale à 2, divisée par 2 à chaque itération sans amélioration) est inférieur à 0,001. Les auteurs développent une heuristique Lagrangienne pour générer des solutions faisables pour le problème initial en se basant sur la solution du problème Lagrangien. Elle est basée sur l'idée suivante : partir des solutions du problème Lagrangien et ajuster les valeurs des variables de décisions de la solution pour satisfaire les contraintes relâchées. La procédure est la suivante :

- pour chaque période  $t$ , on calcule le niveau de non couverture  $u_{jt}$  pour chaque point  $j$  de la grille.
- pour chaque point potentiel  $i$  de la grille, on essaye d'activer un capteur qui n'était pas actif pendant la période  $t$ . Ainsi, on choisit parmi les capteurs déjà déployés, celui qui a le plus grand produit couverture-énergie pour l'activer. La procédure d'activation des

capteurs en mode de veille continue jusqu'à il n'y a plus d'énergie ou jusqu'à ce qu'on puisse plus réduire le degré de non couverture. À ce moment-là, la stratégie suivante est appliquée. Il s'agit de choisir le point  $i$  de la grille pour y installer le capteur  $k$  ayant le meilleur rapport couverture-coût.

- le niveau de non couverture est recalculé.

Cette procédure est répétée jusqu'à ce que la contrainte de couverture soit satisfaite pour la période  $t$ . Si le budget alloué pour le déploiement n'est pas suffisant, on élimine les capteurs qui n'étaient pas utilisés avant la période  $t$ . Des expériences avec deux types de capteurs, sur un nombre de périodes d'activité égal à 10 pour différents points à couvrir et différents budgets ont démontré l'exactitude de l'heuristique par rapport à la résolution avec CPLEX. En effet, lorsque CPLEX donne une solution, l'heuristique Lagrangienne est en moyenne meilleure de 88,2%. En ce qui concerne le temps de résolution de l'heuristique Lagrangienne, il est en moyenne 3,5 fois plus rapide que celui affiché par CPLEX.

Dans une autre étude, Rajagopalan, Ruixin, Mohan, Varshney & Drozd (2007) ont formulé et proposé une résolution du problème du positionnement des capteurs pour une efficacité de localisation des missiles balistiques. Le problème de la localisation des missiles consiste à estimer la position des missiles (coordonnées en 3D) à l'aide des capteurs (coordonnées en 2D). Dans un premier temps, les auteurs ont un framework mathématique pour calculer la borne inférieure de Cramer-Rao (CRLB : Cramer-Rao Lower Bound) qui permet de fournir une borne inférieure de l'estimation des coordonnées des missiles à partir des données de distance, de direction et d'altitude des capteurs. Ensuite, les auteurs définissent le problème comme suit : considérons une grille où les positions des capteurs correspondent aux centres des cellules, le problème de positionnement consiste à déterminer les positions des capteurs qui minimisent la trace de la matrice du CRLB. Les auteurs ensuite démontrent que l'espace de recherche augmente avec le nombre de positions possibles, ce qui rend une recherche exhaustive infaisable en terme de temps calcul surtout que la matrice CRLB implique le calcul d'intégrales triples. C'est pourquoi, les auteurs ont proposé un algorithme évolutionniste. Chaque individu est représenté



par un vecteur de positions possibles de capteurs sur les cellules tel que l' $i^{\text{ème}}$  élément du vecteur contient la valeur  $j$  si le capteur  $j$  est placé à la cellule  $i$ . Le processus évolutionniste (avec  $\mu$  le nombre de parents et  $\lambda$  le nombre d'enfants) est le suivant : choisir  $\mu$  parents parmi la population et générer  $\lambda$  enfants après l'application des mutations et des croisements. Pour le remplacement, on choisit les  $\mu$  meilleurs individus parmi  $(\mu + \lambda)$  individus. Un croisement bipoint avec éliminations des duplications des positions a été choisi quant à l'opérateur de mutation introduit une perturbation sur l'individu de telle manière que chaque capteur (individu) d'une position donnée soit installé à une autre position. Les auteurs ont programmé des simulations avec un nombre de capteurs égal à 4 pour une région de déploiement représentée en 2D de surface 100 Km<sup>2</sup>. Les positions initiales en 3D (en Km) des missiles sont uniformément distribuées dans l'intervalle suivant :

$$70 \leq x \leq 120; 50 \leq y \leq 100; 50 \leq z \leq 100$$

Quant aux paramètres de l'algorithme évolutionniste, ils sont fixés comme suit :  $\mu = 10$ ,  $\lambda = 20$ , une probabilité de croisement égale à 0,9 et une probabilité de mutation égale à 0,1. Les tests réalisés laissent conclure que l'algorithme évolutionniste ainsi décrit donne de meilleurs résultats par rapport aux algorithmes glouton ou génétique développés pour l'évaluation de performance. En effet, la trace CRLB converge vers une valeur minimale de l'ordre de 0,0005 Km<sup>2</sup> dans 150 évaluations par rapport à l'algorithme génétique qui converge vers une valeur de l'ordre de 0,01 Km<sup>2</sup> dans 180 évaluations, par rapport à l'algorithme glouton qui donne une valeur de 0,17 Km<sup>2</sup> et enfin par rapport au schéma de déploiement symétrique qui génère une valeur de la trace CRLB de l'ordre de 0,43 Km<sup>2</sup>.

Xu, Wang, Hassanein & Takahara (2005) modélisent le problème de déploiement d'un réseau de capteurs comme un problème de recouvrement d'ensembles minimal. Étant donné un ensemble de capteurs installés en certaines positions, il s'agit de déterminer le nombre de nœuds relais et leurs emplacements avec des contraintes de connectivité et de durée de vie du réseau. Les nœuds relais vont relayer les données du nœud capteur vers la station de base. Le déploiement des nœuds relais vise à les installer dans un endroit où plusieurs rayons de détection de capteurs se

chevauchent, minimisant ainsi leur nombre. Les auteurs modélisent le problème comme suit : soit  $X$  l'ensemble des capteurs à couvrir,  $F$  une famille de sous-ensembles  $f_i$  de  $X$  et tel que  $f_i$  représente l'ensemble des capteurs dont les rayons de détection se chevauchent. Ainsi, le déploiement optimal des nœuds relais revient à trouver l'ensemble minimal de recouvrement à partir de  $F$  pour  $X$ . En se basant sur un algorithme récursif de type « diviser pour régner », les auteurs présentent une stratégie de déploiement qui consiste à définir une suite de problèmes de recouvrement d'ensembles de petite taille en terme de nombre d'éléments non couverts et d'ensembles de candidats. Il s'agit de réaliser trois fonctions récursives :

- décomposition : ajouter l'index du sous ensemble  $f_i$  choisi à l'ensemble de recouvrement.
- recherche multiple : chercher entre plusieurs ensembles candidats pour les éléments non encore couverts, celui de taille minimale.
- compression : éliminer de  $X$  les éléments couverts ainsi que le sous-ensemble  $f_i$  qui les contient. Cette fonction permet d'éliminer les éléments et les sous-ensembles qui n'auront aucun impact pour la recherche d'ensembles recouvrant.

Le processus essaye de trouver dans un premier temps un élément simple (couvert par un seul sous ensemble  $f_i$ ) à ajouter et fait appel à la fonction de décomposition. La fonction de compression est ensuite invoquée pour éliminer de  $X$  et de  $F$  les éléments couverts. Le processus se fait d'une manière récursive jusqu'à ce que tous les éléments de  $X$  soient couverts où jusqu'à ce que des éléments complexes (un élément couvert par plusieurs sous-ensembles  $f_i$ ) soient trouvés. Dans ce cas, la fonction de recherche multiple va déterminer l'élément de taille minimale. Les résultats des tests générés par les auteurs (pour une surface grille ou pour des réseaux générés aléatoirement) ont permis de conclure que l'optimisation proposée induit une charge de calcul minimale par rapport à l'énumération exhaustive.

Wu, Rao, Du, Iyengar & Vaishnavi (2007) considèrent dans leur article un modèle de détection probabiliste qui définit différentes possibilités de couverture et de détection avec différents coûts. Les auteurs considèrent le problème de déploiement des capteurs avec l'objectif de maximiser la

probabilité de détection des capteurs pour un coût de déploiement donné. Ce problème a été démontré NP-complet en réduisant le problème de sac à dos q-Knapsack Problem (q-KP) où on cherche à un ensemble de  $q$  éléments à un cas particulier du déploiement (Sensor Deployment Problem) q-SDP et où chaque capteur surveille une cellule de la zone de déploiement avec une certaine probabilité. On définit le problème q-KP comme suit : étant donné un ensemble  $U$  de  $n$  éléments, tel que pour  $u \in U$  de taille  $s(u) \in \mathbb{Z}^+$  et de valeur  $v(u) \in \mathbb{Z}^+$ , est ce qu'il existe un sous ensemble  $V \subseteq U$  de  $q$  éléments tels que :

$$\sum_{u \in V} s(u) \leq B$$

et

$$\sum_{u \in V} v(u) \geq K$$

pour un budget  $B$  et une valeur  $K$ . les auteurs démontrent que le problème q-SDP est NP-complet et proposent une approximation basée sur un algorithme génétique à deux dimensions. L'adaptation de l'algorithme génétique standard pour résoudre le problème SDP est la suivante :

- les individus sont encodés par une matrice et dont chaque élément  $(i,j)$  contient le capteur de type  $k$  qui surveille la cellule  $(i,j)$  tel que  $k=1..q$ . Les capteurs sont ordonnés comme suit :

$$d_{s_1}/w(s_1) \geq d_{s_2}/w(s_2) \geq \dots \geq d_{s_k}/w(s_k) \geq \dots \geq d_{s_q}/w(s_q)$$

où  $d_{s_k}$  et  $w(s_k)$  sont la distance de détection maximale et le coût du capteur  $s_k$  de type  $k$  respectivement.

- la fonction de fitness est définie à partir de la fonction objectif et en ajoutant une pénalité  $g$  pour les individus qui dépassent la valeur  $Q$  du budget.
- la sélection des individus se fait selon la probabilité :

$$B_i = \frac{f(R_i)}{\sum_{j=1}^M f(R_j)}$$

où  $f(R_i)$  est la valeur de la fonction fitness de l'individu  $R_i$  et  $M$  la taille de la population. Ainsi, plus  $B_i$  est grand plus l'individu  $R_i$  a la chance de survivre pour les prochaines générations.

La nouvelle génération d'individus est construite comme suit. Deux individus de la population sont sélectionnés d'une manière aléatoire pour générer les nouveaux individus en utilisant les opérations de variation suivantes:

- croisement : c'est un changement de segments (ensemble de cellules contigües) entre deux solutions. Il s'agit de faire un croisement bipoint où les indices de début et de fin sont sélectionnés d'une manière aléatoire ainsi que la taille des segments.
- échange : il s'agit de permuter différents segments de la même solution d'une manière aléatoire.
- mutation : il s'agit de choisir aléatoirement une ou plusieurs cellules et changer leurs valeurs suivant une probabilité de mutation qui dépend du rapport rayon de détection/ prix unitaire.

Les simulations réalisées sur de petites instances montrent que l'approximation basée sur l'algorithme génétique donne un schéma de déploiement avec une probabilité de détection de l'ordre de 94,52% quant à la méthode gloutonne de déploiement uniforme, elle permet d'atteindre une probabilité de détection de l'ordre 88,83% avec le même budget de déploiement. Pour de grandes instances, l'algorithme génétique donne une meilleure probabilité de détection en comparaison aussi avec la méthode gloutonne de déploiement uniforme.

D'autre part, Xu & Sahni (2007) ont développé une formulation en un programme linéaire en nombres entiers avec  $t \cdot n$  variables et  $(t+2) \cdot n$  contraintes (avec  $n$  le nombre de points de la

surface grille à surveiller), pour minimiser le coût de déploiement des capteurs avec garantie de couverture d'un certain ensemble de points. Selon les auteurs, les capteurs peuvent être hétérogènes et multimodaux (permettent de collecter différentes grandeurs physiques). Un algorithme glouton pour le positionnement des capteurs a été développé pour résoudre le programme linéaire pour les grandes instances. De plus, des algorithmes de type  $\theta$ -approximation à temps polynomial pour le cas spécial de déploiement des capteurs sur une grille avec garantie de  $q$ -couverture ont été largement discutés. Il s'agit de trouver pour chaque instance dont la taille est majorée par une constante, des solutions faisables à un facteur  $\theta$  de la solution optimale. Le facteur  $\theta$  est appelé facteur d'approximation de l'algorithme. Ensuite, les auteurs étudient le déploiement des capteurs pour un ensemble de sites sélectionnés afin de minimiser le coût tout en garantissant un degré maximal de couverture des sites cibles. Les nœuds relais ne sont pas déployés car les auteurs considèrent que chaque capteur peut communiquer directement avec la station de base, et que les ressources énergétiques ne sont pas contraignantes. Les auteurs ont prouvé à travers des plans d'expériences la performance de leur méthode par rapport aux schémas de déploiement proposés dans des études précédentes. En effet, le programme linéaire en nombre entiers permet de réaliser une réduction de 78% du coût de déploiement par rapport aux résultats des travaux de Chakrabarty, Iyengar, Qi & Cho (2002). Un autre résultat, les algorithmes d'approximation asymptotiques sont meilleurs pour garantir la  $q$ -couverture avec  $q \leq 4$  quant à l'algorithme glouton, les tests réalisés montrent qu'il est performant pour  $q > 4$ .

M.H. Alaiwy, F.H Alaiwy & Habib (2007) examinent dans leur article le positionnement des actuateurs avec des contraintes de communication temps réel dans un réseau WSN. Ils ont formulé ce problème comme un problème de K-Center Pondéré (CKC : Capacitated K-Center) de la manière suivante. Cette version du CKC consiste à optimiser le délai de communication maximal entre capteurs et actuateurs tout en minimisant le nombre d'actuateurs déployés sur une surface 2D et aussi minimiser le nombre de capteurs non affectés aux actuateurs pour la communication. La modélisation représente le réseau comme un graphe  $G=(V,E)$  où  $V$  est composé de positions pour capteurs et actuateurs,  $E$  représente l'ensemble des liens sans fil du

réseau en question et  $A$  l'ensemble des actuateurs disponibles (avec différentes caractéristiques). Ce problème a été démontré NP-complet. Les auteurs ont développé un algorithme génétique pour optimiser les délais de communication entre capteurs et actuateurs dans un schéma de réseau multi-acteurs (lorsque plusieurs actuateurs reçoivent la même information des capteurs) et optimiser aussi le coût de déploiement. Le processus débute par une population initiale générée aléatoirement qui évolue durant les générations qui suivent. À chaque génération, des opérateurs génétiques sont appliqués aux individus sélectionnés d'une manière aléatoire selon certaines probabilités (réglées par des tests préliminaires) pour produire les individus de la prochaine génération. Seuls les meilleurs individus évalués à partir d'une fonction fitness sont conservés. Pour l'algorithme génétique, un individu est défini par un ensemble de gènes. Chaque gène est représenté par la position  $(x,y)$  de l'actuateur sur la surface. À chaque actuateur on attribue les capteurs qui sont détectés à partir de son rayon de communication. Les opérateurs de variation sont :

- sélection : les individus sont sélectionnés par la technique de la roulette après avoir attribué des probabilités de sélection à chaque individu suivant la fonction de fitness.
- mutation : un individu est choisi. Un gène est choisi aléatoirement pour être remplacé par un actuateur de l'ensemble  $A$ .
- croisement : opère à deux niveaux. Premièrement, deux individus parents sont choisis pour produire deux enfants. Ensuite, on permute les gènes de chaque parent avec ceux des enfants. On choisit deux individus parmi les autres individus résultants.

Les simulations réalisées pour une population de 10 individus (positions) et 1500 actuateurs avec un nombre de générations égal à 100, montrent que la valeur moyenne de la fonction objectif diminue après un nombre réduit de générations, converge à un optimum local avant de diminuer continuellement. Dans les perspectives de recherche, les auteurs envisagent de considérer d'autres modèles de réseaux ainsi que d'autres critères de transmission entre capteurs et actuateurs.

Y. Wang, Hu & Tseng (2008) proposent dans leur article une approche pour le positionnement des capteurs dans différents environnements (ouverts ou fermés) en présence d'obstacles et sans contraintes pour le rayon de détection et de communication. Ce schéma est mis en œuvre en deux étapes. Dans un premier temps, la région à surveiller est partitionnée en un nombre de sous régions. Ces dernières sont classées en régions mono-lignes et en régions multi-lignes. Une région mono-ligne définit une ligne de capteurs qui permet d'assurer une couverture totale tandis qu'une région multi-ligne permet à une région plus vaste d'être couverte par plusieurs lignes de capteurs. La deuxième étape consiste à déployer des capteurs en colonnes afin d'assurer la connectivité entre les lignes de capteurs déployés auparavant. Les auteurs proposent aussi une solution centralisée ainsi qu'une solution distribuée au problème de répartition des capteurs. L'approche centralisée se base sur les résultats obtenus par le problème de placement. Elle permet de transformer la répartition des capteurs en un problème de couplage maximal de poids maximal avec l'objectif de minimiser la consommation énergétique totale pour déplacer les capteurs vers la cible ou encore maximiser l'énergie résiduelle après le déplacement. L'approche distribuée quant à elle permet de la même manière de déterminer les déplacements des capteurs d'une manière autonome. Des simulations ont été programmées pour évaluer le nombre de capteurs à déployer. Les résultats obtenus montrent que l'approche des auteurs permet de déployer un nombre de capteurs minimal par rapport à d'autres schémas tels que le schéma de « connectivité garantie » ou encore celui de « couverture garantie » présentés au début du chapitre. D'autres expériences ont été menées pour mesurer le nombre moyen de sauts (pour définir un plus court chemin) entre deux capteurs du schéma du déploiement et qui permettent de conclure que le nombre moyen de sauts peut être réduit avec l'ajout de deux colonnes de capteurs. L'évaluation des approches de répartition des capteurs introduites dans cet article par rapport à un algorithme de répartition aléatoire (le choix du capteur à déplacer se fait d'une manière aléatoire et de façon centralisée) conclut que l'approche centralisée consomme moins d'énergie et permet d'avoir une grande valeur moyenne d'énergie résiduelle par rapport aux autres approches et que l'approche aléatoire consomme le plus d'énergie.

Les auteurs Mhatre, Rosenberg, Kofman, Mazumdar & Shroff (2005) définissent le problème d'optimisation suivant. Avec l'objectif de minimiser les coûts, il s'agit de déterminer les densités de nœuds hétérogènes pour garantir une durée maximale de fonctionnement du réseau. Les auteurs définissent la durée de vie du réseau comme étant le nombre de périodes durant lesquelles les capteurs ont réussi à collecter les données jusqu'à ce que la connectivité et /ou la couverture ne soient plus garanties. L'approche utilise deux types nœuds : type  $t_0$  (nœuds groupés en clusters) avec un niveau d'énergie  $E_0$  et déployés avec une densité  $\lambda_0$ , type  $t_1$  (nœud central du cluster) avec un niveau d'énergie  $E_1$  et déployés avec une densité  $\lambda_1$ . Les auteurs comparent les résultats pour un déploiement aléatoire et un déploiement basé-grille. Ils ont observé que dans les deux schémas de déploiement, la densité  $\lambda_1$  augmente en raison de  $\sqrt{\lambda_0}$ . Les tests de simulations réalisés sur des surfaces de 100 Km<sup>2</sup> et en comparaison avec la solution exacte dérivée, montrent que l'approximation donne les mêmes résultats. Aussi, les résultats laissent conclure que  $\lambda_0 \gg \lambda_1$  et ce qui valide les approximations faites par les auteurs.

Chaudhry, Hung & Guha (2006) proposent dans leur article une approche évolutionniste pour l'optimisation du déploiement des nœuds. Il s'agit de garantir un maximum de couverture, un minimum d'énergie, maximiser le pourcentage de nœuds qui satisfont k-connectivité et minimiser le pourcentage de nœuds déconnectés. Les auteurs modélisent le réseau des capteurs sans fil comme un génome où chaque gène représente un capteur caractérisé par ses coordonnées 2D, son rayon de détection et son rayon de communication. La population initiale est générée à partir des perturbations effectuées sur le génome initial. La population est divisée en espèces selon la fonction de compatibilité qui permet d'établir la distance entre chaque génome et les autres génomes en se basant sur la quantité de la matière génétique qu'ils partagent (gènes). Ensuite, l'approche évolutionniste attribue un score à chaque génome basé sur l'évaluation des critères suivants: la connectivité, la couverture, le coût énergétique et le nombre de nœuds déconnectés (coefficient de Pareto dominance). L'opérateur de sélection va permettre de



conserver les meilleurs individus et de laisser au moins un individu représentant une espèce donnée. Le croisement des individus sélectionnés permet de générer une nouvelle génération. Les simulations considèrent un génome composé de trois gènes (capteurs). Ces simulations visent à assurer la 2-connectivité et la 3-connectivité pour un ensemble de 10 points d'une surface cercle générés aléatoirement 20 fois. Le processus d'évolution montre une croissance de la couverture ainsi que de la consommation énergétique générée (due à une amélioration de la connectivité) pour atteindre un pourcentage de 100% de couverture après 8600 générations. Les auteurs avancent que cette approche peut être utilisée pour résoudre d'autres problèmes d'optimisation en modifiant les critères pour évaluer le coefficient de Pareto dominance.

Q. Wang, Xu, Takahara & Hassanein (2005b) consacrent leur article au positionnement des nœuds-relais (RN: Relay Nodes) dans les réseaux de capteurs sans fil. Ce positionnement vise la minimisation du coût du déploiement réseau avec des contraintes supplémentaires de durée de vie et de connectivité. Basée sur une approche double-phase, une heuristique va permettre de générer l'emplacement des nœuds-relais (SPRN : Second Phase Relay Node) pour garantir la connectivité et la durée de vie du réseau obtenu après un déploiement initial de ces nœuds-relais (FPRN : First Phase Relay Node, et qui vise à garantir la connectivité et la durée de vie du réseau de capteurs avec un minimum de nœuds-relais). L'algorithme proposé, Best-Effort-Relaying (BER) vise à déployer d'une manière efficace les nœuds relais et ceci en relayant la charge réseau selon la capacité du nœud. Les résultats des simulations réalisées pour des surfaces grille ou pour des réseaux sans topologie fixe ont été comparés avec une borne inférieure dérivée théoriquement, ainsi qu'avec l'algorithme Nearest-To-BS-First (NTBF) développé par Q. Wang, Xu, Hassanein & Takahara (2005a). Les auteurs concluent pour des réseaux de type grille que l'algorithme BER est au pire des cas meilleur que l'algorithme NTBF en terme de charge réseau. Dans le cas des réseaux sans topologie fixe, les auteurs définissent des métriques pour évaluer les deux algorithmes BER et NTBF telles que la capacité d'utilisation (rapport: charge totale du RN/ capacité). Les tests montrent que l'algorithme BER permet de générer une grande capacité d'utilisation par rapport à l'algorithme NTBF et que le rapport : nombre de nœuds relais déployés

dans la 2<sup>ème</sup> phase (SPRN) obtenu par l'algorithme BER (ou encore par l'algorithme NTBF) versus nombre de SPRN obtenu par la borne inférieure est entre 1,1 et 1,3 et ce qui est estimé acceptable par les auteurs.

Biagioni & Sasaki (2006) ont étudié la problématique de l'emplacement des nœuds d'un réseau de capteurs pour la surveillance d'un milieu pour des études d'environnement avec des contraintes de : connectivité, agrégation de données et de coût. Étant donné une région  $A$ , un rayon de transmission de l'ordre de  $r$  et une distance maximale  $\delta$  entre les nœuds pour la couverture de la région  $A$ , l'emplacement des nœuds doit se faire tel que le réseau ait un nombre minimal de nœuds espacés d'une distance  $\delta$  et tolérant les pannes. L'article considère l'emplacement des nœuds dans une région 2D et en particulier pour des surfaces  $A$  de type : carré, triangle et hexagone. Les comparaisons sont basées sur deux paramètres : le nombre de nœuds couvrant la région  $A$  ainsi que la connectivité du réseau en cas de pannes. L'article considère ensuite l'emplacement des nœuds dans une région seule-dimension, et de la même manière fait état de cette architecture en comparant les paramètres définis auparavant pour l'architecture 2D. Les tests réalisés prouvent que le rayon de transmission  $r$  ainsi que la distance entre les nœuds  $\delta$  sont des paramètres clés pour déployer un nombre minimal de capteurs tout en assurant la connectivité et la survie du réseau aux pannes.

Dans une dernière étude, Yildirim, Kalayci & Ugur (2008) se sont intéressés à une stratégie de déploiement initial qui maximise la couverture de l'espace de déploiement tout en couvrant les régions cibles par au moins  $k$  nœuds. Les auteurs définissent le problème comme suit. Étant donné un espace sans obstacle 2D noté  $A(largeur, hauteur)$ ,  $N$  nœuds caractérisés par leurs rayons de détection  $r_s$  et de communication  $r_c$  tels que :  $r_c = r_s * 2$ ,  $h$  régions cibles et un nombre  $k$ . Les régions cibles ont le même rayon que les capteurs. Il s'agit de maximiser la surface totale couverte sous les contraintes suivantes :

- tous les nœuds communiquent entre eux,

- les  $h$  régions cibles sont couvertes par au moins  $k$  nœuds,
- les rayons de détection ainsi que les rayons de communication sont identiques pour tous les nœuds et,
- le centre du rayon de détection doit appartenir à la surface  $A$ .

L'algorithme génétique proposé par les auteurs permet de générer un déploiement optimal qui maximise la couverture de la zone, assure la connectivité entre les nœuds et les régions cibles sont couvertes pas au moins  $k$  nœuds. Les nœuds  $S$  sont représentés avec des coordonnées 2D tels que :

$$\{S(x, y): 0 \leq x \leq \text{largeur}, 0 \leq y \leq \text{hauteur}\}$$

et les individus (avec un nombre total égal à  $T$ ) sont représentés avec un tableau de mouvements tels que :

$$C_0 = \{M_{S_0}, M_{S_1}, \dots, M_{S_N}\}$$

$$C_1 = \{M_{S_0}, M_{S_1}, \dots, M_{S_N}\}$$

$$C_i = \{M_{S_0}, M_{S_1}, \dots, M_{S_N}\}$$

$$C_T = \{M_{S_0}, M_{S_1}, \dots, M_{S_N}\}$$

Ainsi chaque gène  $g_i$  (avec un nombre total égal à  $N$ ) représente le prochain mouvement  $M_{S_i}(x_{inc}, y_{inc})$  du nœud  $S_i$  et qui est calculé de la manière suivante :

$$M_{S_i}(x_{inc}, y_{inc}): \{-r_s * 0.01 \leq x_{inc}, y_{inc} \leq r_s * 0.01\}$$

L'algorithme génétique commence par engendrer une population initiale. À chaque itération et cela jusqu'à ce que le nombre maximum de générations  $G$  soit atteint, les individus évoluent comme suit :

- croisement. Les meilleurs individus sont sélectionnés avec une probabilité  $P_c$  et sont couplés avec un croisement monopoint à partir d'un point sélectionné aléatoirement. Les individus obtenus remplacent les pires individus de la population courante.
- après le croisement, les individus sont mutés avec une probabilité  $P_m$  en remplaçant deux gènes sélectionnés aléatoirement.
- choix de l'élite. Si la meilleure solution de la génération en cours est meilleure que l'élite de toutes les générations précédentes, elle remplace l'élite courante et est appliquée aux coordonnées des nœuds de la prochaine génération pour générer un nouveau placement.

La qualité de chaque solution (individu) ou encore la fonction fitness  $F(C_i)$  est calculée sur la base de 3 critères :

- les auteurs ont utilisé un algorithme polynomial développé par Huang et al (2003) pour vérifier si les régions cibles sont couvertes par  $k$  nœuds. Si la solution  $C_i$  ne satisfait pas la condition de  $k$ -couverture, on lui attribue une valeur négative :

$$F(C_i) = -\infty$$

- le degré de connectivité des nœuds. Il s'agit de déterminer le nombre de composantes connectées dans la solution  $C_i$  en appliquant un algorithme de recherche en profondeur sur le graphe correspondant. Par la suite, on pourra évaluer un graphe déconnecté (avec plusieurs composantes connectées) en attribuant à la fonction fitness la valeur suivante :

$$F(C_i) = -(D_{cc} * N_{cc})$$

tel que  $N_{cc}$  est le nombre de composantes connexes et  $D_{cc}$  est la somme des plus courtes distances entre les différentes composantes.

- la couverture. Estimée selon une technique de traitement d'images et qui consiste à représenter graphiquement les nœuds de la solution  $C_i$  sur un plan 2D. Ainsi, tous les pixels qui ont une couleur ( $Couleur_{ij}$ ) différente de la couleur du plan (blanche) sont utilisés pour comptabiliser la surface totale couverte  $A_c$ :

$$F(C_i) = A_c = \sum_{i=0}^{\text{largeur}} \sum_{j=0}^{\text{hauteur}} \begin{cases} 0 & \text{si } Couleur_{ij} = \text{blanche} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

Les expériences de simulation réalisées ont comme paramètres :  $T=100$ ,  $G=4000$ ,  $P_c=0.7$ ,  $P_m=0.2$ ,  $k=2$ ,  $h=3$  régions cibles sur une surface  $A= 400*400$  pixels et  $N=12$  nœuds dont le rayon de détection  $r_s$  est égal à 50 pixels. Une solution initiale consistait à placer  $k$  nœuds pour couvrir chaque région cible et le reste des nœuds ont été placés aléatoirement sur la surface. Les auteurs ont développé aussi un environnement de simulation qui permet d'illustrer en mode graphique le déploiement généré par l'algorithme génétique et l'évolution de la surface totale couverte après chaque génération. Les auteurs affirment que l'algorithme proposé permet de trouver une distribution optimale des nœuds en un temps raisonnable et étudient une méthode pour résoudre le problème d'ensembles de  $k$ -couverture connectés avec un minimum d'éléments.

On peut remarquer que les problèmes de positionnement décrits dans cet exposé de travaux de recherche considèrent un modèle de détection des capteurs non réaliste (binaire ou probabiliste). De plus, la plupart des travaux se basent sur des hypothèses simplistes concernant la géométrie de la surface à surveiller ou encore les rayons de détection et de communication pour assurer la couverture et la connectivité. Le chapitre suivant présente le modèle de positionnement avec garantie de localisation et de connectivité à étudier.

## **CHAPITRE 3      MODÉLISATION DE LA PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODES DE RÉOLUTION**

### **3.1 Introduction**

Le modèle qu'on présente dans ce chapitre se propose de résoudre le problème de positionnement en tenant en compte des hypothèses suivantes, et qui sont des restrictions imposées par les articles présentés dans la partie revue de littérature:

- le modèle de détection des capteurs n'est ni binaire ni probabiliste étant donné que le modèle tient en compte des caractéristiques de propagation du signal dans l'environnement.
- le choix parmi un ensemble de types de capteurs avec différents coûts et différentes caractéristiques.
- le réseau n'impose aucune topologie fixe, ce qui permet de considérer le positionnement dans des environnements non structurés.
- les rayons de détection et les rayons de communication peuvent être différents du moment que les caractéristiques de propagation sont prises en compte.

### **3.2 Modélisation**

Avant de présenter le modèle, on considère les informations suivantes :

1. le réseau peut être déployé sur une surface 2D ou 3D,
2. les coordonnées des sites potentiels pour installer les capteurs ainsi que les coûts d'installation y afférents,
3. les coordonnées des mobiles et leurs caractéristiques,
4. les caractéristiques des capteurs simples et ceux avec capacité de calcul : puissance de transmission, nombre de signaux min reçus d'un mobile pour des fins de localisation et
5. les caractéristiques de propagation dans un environnement 2D ou 3D.

### 3.2.1 Notation

La notation suivante est utilisée tout au long de ce mémoire. Elle concerne les ensembles, les variables de décision, et les constantes.

- **Ensembles** : soient  $I$  l'ensemble des positions probables en 2D ou 3D pour les mobiles (2D ou 3D) ;  $J_s$  l'ensemble des sites potentiels pour les capteurs simples (sans capacité de calcul) ;  $J_c$  l'ensemble des sites potentiels pour les capteurs avec capacité de calcul ;  $T_s$  l'ensemble des types de capteurs simples et  $T_c$  l'ensemble des types de capteurs avec capacité de calcul. Notons qu'un site peut être dans les deux ensembles si l'on peut installer les deux types de capteurs ( $t \in T_s$  et  $t \in T_c$ ). On a ainsi  $J \subseteq J_s \cup J_c$  et  $T = T_s \cup T_c$ .
- **Variables** : soient  $u_j^t$  tel que  $u_j^t = 1$  si et seulement si un capteur de type  $t \in T_s$  est installé au site  $j \in J_s$ ,  $v_j^t$  tel que  $v_j^t = 1$  si et seulement si un capteur de type  $t \in T_c$  est installé au site  $j \in J_c$ ,  $w_j^t$  tel que  $w_j^t = 1$  si et seulement si  $u_j^t = 1$  ou  $v_j^t = 1$ ,  $x_{ij}$  tel que  $x_{ij} = 1$  si et seulement si le capteur de type  $t \in T$  installé au site  $j \in J$  reçoit une puissance d'un mobile à la position  $i \in I$  supérieure ou égale à la puissance minimale du capteur de type  $t \in T$  et  $y_{jj'}$  tel que  $y_{jj'} = 1$  si et seulement si le capteur de type  $t \in T$  installé au site  $j' \in J$  reçoit une puissance du capteur de type  $t' \in T$  installé au site  $j \in J$  supérieure ou égale à la puissance minimale requise par le capteur de type  $t'$ . Soient aussi  $q_{ijkl}$  tel que  $q_{ijkl} = 1$  si le lien  $(k, l)$  est utilisé pour l'affectation du flot de la source  $i$  vers la destination  $j$ ,  $d_{od}$  plus court chemin entre le site  $o \in J$  et le site  $d \in J$  et  $z_j$  nombre de capteurs minimums entre un capteur simple (de type  $t \in T_s$ ) installé au site  $j \in J$  et un capteur avec capacité de calcul (de type  $t' \in T_c$ ) installé au site  $d \in J$ .

- **Constantes** : soient  $\alpha_{ij}$  atténuation du signal émis entre la position  $i \in I$  et le site  $j \in J$  sur lequel est installé un capteur de type  $t \in T$ ,  $\beta_{ij}$  atténuation du signal émis entre le site  $j \in J$  et le site  $j' \in J$  sur lesquels sont installés des capteurs de type  $t \in T$ ,  $p_i$  puissance de transmission d'un mobile à la position  $i \in I$ ,  $p^t$  puissance de transmission d'un capteur de type  $t \in T$  pour la communication entre les capteurs. Soient aussi  $p_{\min}^t$  puissance minimale pour qu'un signal soit reçu par un capteur de type  $t \in T$  ou encore sensibilité de réception du capteur,  $n_{\min}$  nombre minimum de signaux reçus pour localiser un mobile,  $h_{\max}$  nombre maximum de sauts permis entre un capteur simple et un capteur avec capacité de calcul et  $c_j^t$  coût du capteur de type  $t \in T$  installé au site  $j \in J$ .

### 3.2.2 Le modèle

Nous présentons le modèle pour le positionnement des capteurs avec des contraintes de localisation :

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} c_j^t w_j^t \quad (3.1)$$

Sujet à :

$$\alpha_{ij} p_i x_{ij} - \sum_{t \in T} p_{\min}^t w_j^t x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.2)$$

Contraintes de localisation :

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \geq n_{\min} \quad \forall i \in I \quad (3.3)$$



Contraintes d'affectation des capteurs aux sites :

$$\begin{aligned}
 x_{ij} &\leq \sum_{t \in T} w_j^t & \forall i \in I, j \in J \\
 w_j^t &= u_j^t & \forall j \in Js, t \in T \\
 w_j^t &= v_j^t & \forall j \in Jc, t \in T
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

$$\beta_{jj'} \sum_{t \in T} p^t w_j^t \sum_{t' \in T} w_{j'}^{t'} y_{jj'} - \sum_{t \in T} w_j^t \sum_{t' \in T} p_{\min}^{t'} w_{j'}^{t'} y_{jj'} \geq 0 \quad \forall j, j' \in J; j \neq j' \tag{3.5}$$

Contraintes de conservation de flots

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \in J} q_{ijlk} - \sum_{l \in J} q_{ijkl} &= -1 & k = i, \forall i, j, k \in J \\
 \sum_{l \in J} q_{ijlk} - \sum_{l \in J} q_{ijkl} &= 0 & k \neq i, k \neq j, \forall i, j, k \in J \\
 \sum_{l \in J} q_{ijlk} - \sum_{l \in J} q_{ijkl} &= 1 & k = j, \forall i, j, k \in J
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$q_{ijkl} \leq y_{kl} \quad \forall i, j, k, l \in J \tag{3.7}$$

$$d_{ij} = \sum_{k \in J} \sum_{l \in J} q_{ijkl} \quad \forall i, j \in J \tag{3.8}$$

$$d_{oo} = 0 \quad \forall o \in J \tag{3.9}$$

$$d_{oj} \leq M \sum_{t \in T} w_o^t \quad \forall o, j \in J; o \neq j \tag{3.10}$$

$$d_{oj'} \leq d_{oj} + y_{jj'} + (1 - y_{jj'})M \quad \forall o, j, j' \in J; j \neq j' \tag{3.11}$$

$$d_{jj'} \leq y_{jj'} + (1 - y_{jj'})M \quad \forall j, j' \in J; j \neq j' \tag{3.12}$$

$$z_j \leq d_{jj'}, \quad \forall j \in Js, j' \in Jc, t \in Tc \quad (3.13)$$

$$z_j \leq h_{\max} \sum_{t \in Ts} u_j^t \quad \forall j \in Js \quad (3.14)$$

Contraintes d'intégralité

$$\begin{aligned} u_j^t &\in \{0,1\} & \forall j \in Js, t \in Ts \\ v_j^t &\in \{0,1\} & \forall j \in Jc, t \in Tc \\ x_{ij} &\in \{0,1\} & \forall i \in I, j \in J \\ y_{jj'} &\in \{0,1\} & \forall j, j' \in J; j \neq j' \end{aligned} \quad (3.15)$$

La fonction objectif (3.1) présente le coût des capteurs à installer et qui reflète le coût d'un déploiement optimal des capteurs. La contrainte (3.2) impose que la puissance du signal reçu même après atténuation de chaque position  $i \in I$  pour mobiles, soit supérieure ou égale au minimum nécessaire pour que chaque capteur de type  $t \in T$  installé au site  $j$  puisse le recevoir. La contrainte (3.3) stipule que le nombre de signaux reçus du mobile installé à la position  $i$  par les capteurs installés aux sites  $j \in J$  soit supérieur ou égal au nombre minimum pour des fins de localisation des mobiles (en considérant la technique de tri-latération). La contrainte (3.4) suscite que le signal d'un mobile à la position  $i$  ne puisse être reçu au site  $j$  que si au moins un capteur de type  $t \in T$  est installé au site  $j$ . La contrainte (3.5) impose que la puissance du signal reçu même après atténuation de chaque site  $j$  (sur lequel est installé un capteur de type  $t \in T$ ) soit supérieure ou égale au minimum nécessaire pour que chaque capteur de type  $t' \in T$  installé au site  $j'$  puisse le recevoir. Quant à la contrainte (3.6), elle représente les règles de conservation des flots pour les sources, nœuds intermédiaires et destinations. En relation avec la contrainte (3.6), la contrainte (3.7) suscite que le prochain saut de  $k$  du site  $i$  vers le site  $j$  soit  $l$  s'il y a communication directe entre le site  $k$  et le site  $l$ . La contrainte (3.8) calcule les plus courts chemins entre le site  $i$  et le site  $j$ . Ainsi, Les contraintes (3.6)-(3.8) assurent qu'il existe un chemin optimal entre deux sites  $j$  et  $j'$

en terme de nombre de sites intermédiaires. Pour les contraintes (3.9)-(3.10) permettent de calculer la distance d'un site  $j$  vers les autres sites si un capteur de type  $t \in T$  est installé au site  $j$ . Quant aux contraintes (3.11) et (3.12), elles imposent l'utilisation des liens directs pour calculer les  $d_{jj'}$  et ainsi d'avoir les plus courts chemins. La contrainte (3.13) calcule le nombre minimum de capteurs  $z_j$  entre un capteur simple installé au site  $j$  et un capteur avec capacité de calcul installé au site  $j'$ ; et la contrainte (3.14) définit une borne supérieure  $h_{max}$  de sauts vers les sites à capteurs avec capacité de calcul. La dernière contrainte concerne les contraintes d'intégralité.

Comme on peut le voir, la contrainte (3.2) est non linéaire mais peut être linéarisée en ajoutant des variables et des contraintes. Soit  $x_{ij}^t = 1$  si et seulement si le capteur de type  $t \in T$  installé au site  $j \in J$  reçoit une puissance d'un mobile à la position  $i \in I$  supérieure ou égale à la puissance minimale requise par le capteur  $t \in T$ , ainsi la contrainte devient :

$$x_{ij} = \sum_{t \in T} x_{ij}^t \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.16)$$

$$x_{ij}^t \leq w_j^t \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (3.17)$$

$$\alpha_{ij} p_i x_{ij} - \sum_{t \in T} p_{\min}^t x_{ij}^t \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.18)$$

$$x_{ij}^t \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (3.19)$$

Aussi pour la contrainte (5), peut être linéarisée en ajoutant des variables et des contraintes. Soit  $y_{jj'}^{t'} = 1$  si et seulement si le site  $j \in J$  sur lequel est installé le capteur  $t \in T$  communiqué avec le site  $j' \in J$  sur lequel est installé le capteur  $t' \in T$ . Ainsi la contrainte est réécrite comme suit :

$$\beta_{jj'} \sum_{t \in T} p^t \sum_{t' \in T'} y_{jj'}^{tt'} - \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T'} p_{\min}^{t'} y_{jj'}^{tt'} \geq 0 \quad \forall j, j' \in J \quad (3.20)$$

$$y_{jj'} = \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T'} y_{jj'}^{tt'} \quad \forall j, j' \in J \quad (3.21)$$

$$y_{jj'}^{tt'} \leq w_j^t \quad \forall j, j' \in J, t, t' \in T \quad (3.22)$$

$$y_{jj'}^{tt'} \leq w_{j'}^{t'} \quad \forall j, j' \in J, t, t' \in T \quad (3.23)$$

$$y_{jj'}^{tt'} \in \{0, 1\} \quad \forall j, j' \in J, t, t' \in T \quad (3.24)$$

### 3.3 Complexité et motivation pour les heuristiques

Le problème de positionnement des capteurs formulé dans la section précédente peut être subdivisé en deux problèmes et qui sont :

- Problème de Positionnement proprement dit : PP.
- Problème de conservation de flots.

**Proposition** : le problème de positionnement des capteurs est NP-difficile.

Le problème de Recouvrement Multiple d'Ensembles ou Set MultiCover Problem est une généralisation du problème de Recouvrement d'Ensembles (Set Cover Problem) pour lequel chaque élément  $i$  doit être couvert par un nombre minimum d'ensembles  $r_i$ . Il s'agit de couvrir tous les éléments un certain nombre de fois tout en minimisant les coûts (Fujito & Kurahashi, 2006). Formellement, le programme linéaire correspondant est :

$$\begin{aligned}
& \min \sum_j c(S_j) x_{S_j} \\
& \sum_{j: i \in S_j} x_{S_j} \geq r_i \quad \forall i = 1, \dots, m \\
& x_{S_j} \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, n
\end{aligned}$$

tel que  $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_n\}$  ensemble des sous-ensembles  $S_j$  avec  $\bigcup_j S_j = U$  avec  $j = 1, \dots, n$

et  $U$  ensemble d'éléments  $i = 1, \dots, m$ . On définit  $x_{S_j} = 1$  si l'ensemble  $S_j$  est choisi dans la solution,  $C(S_j)$  coût de choix de l'ensemble  $S_j$  et  $r_i$  le nombre minimum de sous-ensembles  $S_j$  pour couvrir l'élément  $i$ .

Le problème de Set MultiCover Problem (SMCP) peut être réduit en un Problème de Positionnement PP comme suit : étant donnée une instance du problème SMCP, on peut construire une instance du PP telle qu'une solution optimale du PP soit aussi une solution optimale du SMCP. On définit :

- **Constantes** : Soit  $C(S_j)$  la fonction du coût d'installation d'un capteur au site  $j$ . Soit aussi  $r_i$  le nombre minimum d'ensembles qui couvre l'élément  $i$  et qu'on appelle le facteur de couverture. On pose  $r_i = n_{\min} \forall i = 1, \dots, m$  et tel que  $n_{\min}$  est le nombre minimum de sites pour couvrir les positions (défini plus haut).
- **Ensembles** : Soit  $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_n\}$  ensemble des sous-ensembles  $S_j$  tel que  $\bigcup_j S_j = U$  et  $U = \{p_1, \dots, p_m\}$  avec  $n$  le nombre de sites,  $m$  le nombre de positions probables pour les mobiles et  $p_i$  qui signifie l' $i^{\text{ème}}$  position. Chaque  $S_j$  contient les positions des mobiles qui sont couvertes par le site  $j$  sur lequel on a installé un capteur dont la puissance de détection d'un signal reçu d'un mobile est notée  $p_{\min}$ .
- **Variables** : Soit  $x_{S_j}$  tel que  $x_{S_j} = 1$  si l'ensemble  $S_j$  est inclus dans la solution et  $x_{S_j} = 0$  dans le cas contraire.

Il s'agit alors de trouver les ensembles qui recouvrent toutes les positions des mobiles avec  $n_{\min}$

d'ensembles  $S_j$ . Le problème de SMCP est un problème classique de l'optimisation combinatoire et qui a été démontré NP-difficile (Karp, 1972) d'où, le problème PP est NP-difficile.

Ceci a permis de démontrer que le problème de positionnement des capteurs est NP-difficile. Nous consacrerons le reste du chapitre aux métaheuristiques qui permettront d'approcher l'optimum global pour les grandes instances du moment que la résolution du programme linéaire présente une complexité de calcul et que le problème de positionnement peut avoir plusieurs optimums locaux.

### 3.4 Métaheuristiques et recherche avec tabous

Les métaheuristiques sont des stratégies qui permettent d'explorer l'espace de recherche afin d'approcher des solutions optimales. Elles peuvent faire appel à des heuristiques qui tiennent compte de la spécificité du problème traité. Les métaheuristiques les plus classiques sont celles fondées sur la notion de parcours. Ce type d'algorithme fait évoluer à chaque itération la fonction objectif sur l'espace de recherche local (voisinage) puis la compare aux meilleures évaluations déjà trouvés. La recherche avec tabous qui fait partie de cette classe repose sur les déplacements (mouvements) de la fonction objectif dans l'espace de recherche local, combinés à une amélioration régulière de cet espace local grâce à la mémorisation des déplacements précédents. Cette méthode permet de guider les recherches en dehors des zones précédemment parcourues.

Le principe de la recherche avec tabous est donc de choisir à chaque itération, la meilleure solution  $S'$  appartenant au voisinage de la solution courante  $S$ , même si cela engendre une dégradation de la valeur de la fonction objectif, cas qui se produit lorsqu'on atteint un minimum local. Une liste qui mémorise les dernières solutions visitées ou leurs attributs appelée liste avec tabous est créée. Elle permet d'interdire tout mouvement (appelé mouvement tabou) vers les solutions de cette liste pour un certain nombre d'itérations qui détermine aussi la taille de la liste. Le processus peut prendre fin selon l'un des critères suivants : temps maximum d'exécution, aucune amélioration pendant un certain nombre d'itérations ou encore le nombre maximal d'itérations est atteint.

### 3.5 Résolution du problème du positionnement

Pour résoudre le problème de placement des capteurs, on doit déterminer :

- Le vecteur  $W$  par la résolution du problème SMCP,
- Le vecteur  $X$  par la contrainte (3.2),
- Le vecteur  $Y$  par la contrainte (3.5),
- Le vecteur  $Q$  et le vecteur  $D$  par un algorithme de Plus Court Chemin (PCC) et
- Le vecteur  $Z$  par les contraintes (3.13) et (3.14)

On propose la fonction objectif qui peut être décomposée en trois parties: la première partie concerne le coût d'installation des capteurs, pour la 2<sup>ème</sup> partie, on introduit des pénalités pondérées (paramètre  $\theta_1$ ) pour la violation de la contrainte (3.3) qui concerne la localisation des mobiles; quant à la 3<sup>ème</sup> partie, elle sert à exprimer par des pénalités pondérées aussi (paramètre  $\theta_2$ ), la violation des contraintes (3.13) et (3.14) et qui concernent le nombre de sauts minimum entre un capteur simple et un capteur complexe:

$$f = \sum_j \sum_t c_j^t w_j^t + \theta_1 \sum_i \left( \sum_j x_{ij} - n_{\min} \right)^+ + \theta_2 \sum_j (z_j - h_{\max})^+ \quad (3.25)$$

et tel que :

$$f^+ = \begin{cases} 0 & \text{si } f \leq 0 \\ f & \text{sinon} \end{cases}$$

étant donné que la pénalité ne peut s'appliquer que s'il y a violation des contraintes.

### 3.5.1 Heuristique initiale

L'heuristique initiale consiste à trouver un positionnement initial des capteurs. La procédure est gloutonne. Pour chaque type de capteur  $t$ , on part d'une solution vide où aucun capteur n'est installé. Ensuite, on détermine pour chaque site  $j$  (sur lequel on n'a pas encore installé de capteurs) l'ensemble des positions restantes  $E_j$  et qui peuvent être localisées en installant le capteur  $t$  (contrainte (3.3)). On cherche le site  $j$  qui maximise le nombre de positions de l'ensemble  $E_j$  puis on élimine le site  $j$  ainsi que les positions de l'ensemble  $E_j$  des ensembles des sites et des positions respectivement. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que toutes les positions soient localisées ou jusqu'à ce qu'on ne peut plus couvrir de positions. Une fois les sites déterminés, on peut calculer la couverture (le vecteur  $X$ ), la connectivité (le vecteur  $Y$ ), les plus courts chemins (les vecteurs  $Q$  et  $D$ ) ainsi que le nombre minimum de sauts  $z_j$  (le vecteur  $Z$ ). Après l'évaluation de cette solution, on détermine si ce coût est meilleur que le coût déjà trouvé. Si c'est le cas, on met à jour la meilleure solution.



### Algorithme de l'heuristique initiale

**Pour chaque**  $t \in T$

$Sites = \emptyset$  ;

$PositionsNonEncoreLocalisées = \text{vrai}$ ;

**Faire**

**Pour chaque**  $j \in Sites$

Déterminer  $E_j$  qui contient les positions non encore couvertes et qui peuvent être couvertes en utilisant la contrainte (3.2);

**FinPour**

Choisir  $j \in J \setminus Sites$  avec  $E_j$  ayant le plus grand nombre de positions;

**Si** ( $j \neq 0$ )

$Sites = Sites \cup \{j\}$ ;

Mettre à jour les positions couvertes;

**FinSi**

S'il n'existe pas de positions non encore localisées

$PositionsNonEncoreLocalisées = \text{faux}$ ;

**FinSi**

**Tant que** ( $PositionsNonEncoreLocalisées = \text{vrai}$  et  $j \neq 0$ )

**Pour chaque**  $j \in Sites$

mettre  $w_j = t$  sinon  $w_j = 0$ ;

**FinPour**

Calculer le vecteur  $X$ ;

Calculer le vecteur  $Y$ ;

Calculer les vecteur  $Q$  et  $D$ ;

Calculer le vecteur  $Z$ ;

Calculer la fonction objectif. Si la valeur de la fonction objectif est meilleure que la valeur du meilleur coût, mettre à jour la meilleure solution;

**FinPour**

Retourner la meilleure solution.

Figure 3.1: Algorithme de l'heuristique initiale

### 3.5.2 Algorithme de la recherche avec tabous de base

Étant donné  $|J|$  sites potentiels pour installer  $|T|$  capteurs simples et ceux avec complexité de calcul. Il existe  $|T|+1$  états possibles pour chaque site  $j$  (on prend en considération  $t=0$  qui signifie qu'aucun type de capteurs n'est installé). L'espace de solutions est l'ensemble des combinaisons possibles des états sites et qui est de l'ordre de  $(|T|+1)^{|J|}$ . Le voisinage d'une solution est l'ensemble des combinaisons dont l'état de l'un des sites change. Ainsi, le nombre de voisins est :  $|T|/|J|$ . On définit un mouvement pour une solution courante  $S$  (ensemble de paires  $\langle \text{site}, \text{capteur} \rangle$  avec  $\text{site} \in J$ ,  $\text{capteur} \in T$  et  $\text{capteur} \neq 0$ ) comme suit. Soient par exemple  $\text{capteur1}$  installé au  $\text{site1}$  et  $\text{capteur1}'$  à installer au même  $\text{site1}$ , on représente le mouvement par des attributs de la solution:  $\langle \text{site1}, \text{capteur} ; \text{site1}, \text{capteur1}' \rangle$  et qui signifie que le capteur de type  $\text{capteur1}$  est remplacé par  $\text{capteur1}'$  pour le site  $\text{site1}$ . Les mouvements ainsi définis permettent de réduire, élargir et maintenir la taille de l'ensemble des sites installés (nombre de sites pour lesquels on a installé des capteurs) :

- $\langle \text{site2}, 0 ; \text{site2}, \text{capteur2} \rangle$
- $\langle \text{site1}, \text{capteur1} ; \text{site1}, 0 \rangle$
- $\langle \text{site1}, \text{capteur1} ; \text{site1}, \text{capteur1}' \rangle$
- $\langle \text{site1}, \text{capteur1} ; \text{site2}, \text{capteur2} \rangle$

tels que  $\text{site1} \in S$ ,  $\text{site2} \notin S$ ,  $\text{capteur1} \in T$  et  $\text{capteur2} \in T$ . Ces mouvements sont du type 1-échange (voisinage obtenu en changeant un élément de la solution) (Aarts & Lenstra, 2003) du moment qu'il s'agit de changer l'état de la solution courante  $S$  par une autre du voisinage de cette solution. Ainsi, le voisinage  $N(S)$  d'une solution  $S$  peut être défini comme suit :

$$N(S) = \{S + \{\text{site2}, \text{capteur2}\}\} \cup \{S - \{\text{site1}, \text{capteur1}\}\} \cup \{S + \{\text{site2}, \text{capteur2}\} - \{\text{site1}, \text{capteur1}\}\} \cup \{S + \{\text{site1}, \text{capteur1}'\} - \{\text{site1}, \text{capteur1}\}\}$$

À chaque itération, on détermine le meilleur mouvement parmi ceux permis tout en respectant les règles de la recherche avec tabous et le critère d'aspiration. Ainsi, la liste avec tabous qui est de type IN (on interdit d'introduire les mouvements de la liste dans la solution) contient les mouvements tabous pour un certain nombre d'itérations fixe ou compris entre

$[long_{min}, long_{max}]$  (paramètres de l'algorithme). Le critère d'aspiration permet de considérer la solution trouvée même si celle-ci a été obtenue après l'application d'un mouvement tabou, du moment qu'elle va permettre d'améliorer la fonction objectif.

L'algorithme de recherche avec tabous présenté ci-après utilise plusieurs paramètres :

- type de la liste avec tabous : c'est une liste de type In comme déjà expliqué et dont on peut paramétrer la taille : taille fixe ou comprise entre une valeur  $long_{min}$  et  $long_{max}$ .
- critère d'arrêt : on définit 3 critères
  - temps exécution
  - nombre d'itérations
  - nombre d'itérations sans amélioration.
- critère d'aspiration : paramètre qui définit si on va utiliser le critère d'aspiration ou non.
- taille de l'échantillon : nombre entier qui détermine l'intervalle dans lequel on va enregistrer les valeurs du coût et du meilleur coût.
- pourcentage : pourcentage des candidats ou taille du voisinage.

Algorithme de l'heuristique de recherche avec tabous de base
<p>Engendrer une configuration initiale <math>S</math> par l'heuristique initiale ;  <math>S^*=S</math> et <math>f^*=f(S)</math>;  <math>T=\emptyset</math>;  <b>Répéter</b>            <math>m</math> = le meilleur mouvement parmi les mouvements non tabous et les            mouvements tabous non exceptionnels en utilisant un critère            d'aspiration. Pour chaque mouvement, on résout le problème du            placement comme décrit à la section 3.5;            Appliquer le meilleur mouvement <math>m</math> à la solution courante <math>S</math> : <math>S=S\oplus m</math> ;            <b>Si</b> <math>f(S) &lt; f(S^*)</math>                <math>S^*=S</math>;                <math>f^*=f(S)</math>;            <b>FinSi</b>            Mettre à jour la liste avec tabous <math>T</math>;  <b>Jusqu'à</b> <math>\langle \text{condition\_fin} \rangle</math>  Retourner <math>S^*</math>.</p>

Figure 3.2: Algorithme de l'heuristique de recherche avec tabous de base

### 3.5.2.1 Description du choix du meilleur mouvement de l'algorithme de recherche avec tabous

Le choix du meilleur mouvement consiste à explorer le voisinage de la solution courante et de retenir le site et le type de capteur avec le meilleur rapport : nombre de positions à couvrir/coût de couverture. Ce processus est exécuté jusqu'à ce que la condition d'arrêt de l'algorithme de recherche avec tabous soit atteinte. La procédure suivante décrit le choix du mouvement effectué par l'algorithme de recherche avec tabous:

Algorithme de choix du meilleur mouvement
<p> <i>Candidats</i> = <math>\emptyset</math>;  <i>Candidats</i> = obtenirCandidats();  <i>Mincout</i> = Valeur_Max;  <b>Tant que</b> <i>candidats</i> <math>\neq \emptyset</math> <b>faire</b>            <i>m</i> = mouvement (<i>siteCandidat</i>, <i>ancienCapteur</i>, <i>nouveauSite</i>, <i>nouveauCapteur</i>)            <i>coutPl</i> = CoutPlacement(<math>S \oplus m</math>)            <b>Si</b> (<i>coutPl</i> <math>\leq</math> <i>mincout</i>)                <b>Si</b> (<i>m</i> n'est pas tabou) <b>ou si</b> (<i>m</i> est tabou et on utilise critère aspiration)                    <i>mincout</i> = <i>coutPl</i>;                    <i>site1M</i> = <i>nouveauSite</i>;                    <i>capteur1M</i> = <i>nouveauCapteur</i>;                    <i>site2M</i> = <i>siteCandidat</i>;                    <i>capteur2M</i> = <i>ancienCapteur</i>;                <b>FinSi</b>            <b>FinSi</b>            <b>FinTantQue</b>            créerMouvement (<i>site1M</i>, <i>capteur1M</i>, <i>site2M</i>, <i>capteur2M</i>). </p>

Figure 3.3: Algorithme de choix du meilleur mouvement

### 3.5.3 Algorithme de la recherche avec tabous diversifiée

La technique de diversification vise à aider la recherche avec tabous de base à entreprendre une exploration assez large de l'espace de recherche. L'usage de cette technique doit être bien fait afin que l'exploration puisse identifier rapidement des régions avec des solutions de bonne qualité sans perdre trop de temps à explorer des régions moins prometteuses. Une des techniques de diversification est la mémoire basée sur la fréquence. Elle a pour objectif de mémoriser le nombre de fois ou la fréquence que les mouvements ont été impliqués dans une solution. Cette information permet d'identifier les régions de l'espace de recherche les plus visitées. Plus précisément, on a défini un attribut de la solution par le couple  $\langle \text{site}, \text{capteur} \rangle$  et la fréquence de l'attribut consiste en le nombre de fois d'implication dans un mouvement. De là, on va interrompre la recherche avec tabous de base périodiquement ou après un certain nombre d'itérations pendant lesquelles la solution n'a pas été améliorée. On effectue une relance en

partant d'une solution partielle qui inclut le mouvement le moins fréquent et qui est complétée par l'algorithme glouton de l'heuristique initiale décrit plus haut pour constituer la solution courante de l'algorithme de recherche avec tabous diversifiée.

L'algorithme, utilise en plus des paramètres de l'algorithme tabou de base, les deux paramètres suivants :

- le temps de relance : TempsRelance et
- le nombre d'itérations pendant lesquelles la valeur de la meilleure solution a stagné : IterRelance.

et qui permettent d'exécuter la procédure correspondante. Les deux procédures sont décrites dans les figures 3.4 et 3.5.

**Algorithme de recherche avec tabous diversifiée selon le temps de relance**

*Engendrer une configuration initiale  $S$  par l'heuristique initiale ;*

$S^*=S;$

$f^*=f(S);$

$T= \emptyset;$

**Répéter**

**Si**  $\text{TempsRelance} < \text{temps}$

*Diversifier;*

**Sinon**

$m =$  le meilleur mouvement parmi les mouvements non tabous et les mouvements tabous non exceptionnels en utilisant un critère d'aspiration. Pour chaque mouvement, on résout le problème du placement comme décrit à la section 3.5;

**FinSi**

*Appliquer le meilleur mouvement  $m$  à la solution courante  $S$  :  $S=S \oplus m$  ;*

*Mettre à jour du tableau des fréquences des attributs les moins fréquents ;*

*Mettre à jour la liste avec tabous  $T$ ;*

**Si**  $f(S) < f(S^*)$

$S^*=S;$

$f^*=f(S);$

**FinSi**

*Mettre à jour la liste avec tabous  $T$ ;*

**Jusqu'à** *<condition\_fin>*

*Retourner  $S^*$ .*

Figure 3.4: Procédure de recherche avec tabous diversifiée selon le temps de relance

**Algorithme de recherche avec tabous diversifiée selon le nombre d'itérations sans amélioration**

*Engendrer une configuration initiale  $S$  par l'heuristique initiale ;*

$S^* = S;$

$f^* = f(S);$

$T = \emptyset;$

**Répéter**

*$m$  = le meilleur mouvement parmi les mouvements non tabous et les mouvements tabous non exceptionnels en utilisant un critère d'aspiration. Pour chaque mouvement, on résout le problème du placement comme décrit à la section 3.5;*

*Appliquer le meilleur mouvement  $m$  à la solution courante  $S$  :  $S = S \oplus m$  ;*

*Mettre à jour le tableau des fréquences des attributs les moins fréquents ;*

*Mettre à jour la liste avec tabous  $T$ ;*

**Si**  $f(S) < f(S^*)$

$S^* = S;$

$f^* = f(S);$

**Sinon**

$IterSansAmélioration++;$

**Si**  $(IterSansAmélioration \% IterRelance = 0)$

*Diversifier;*

**FinSi**

**FinSi**

**Jusqu'à** *<condition\_fin>*

*Retourner  $S^*$ .*

Figure 3.5: Procédure de recherche avec tabous diversifiée selon le nombre d'itérations sans amélioration



## CHAPITRE 4 PLAN D'EXPÉRIENCES, RÉSULTATS ET ANALYSES

Le déploiement d'un réseau de capteurs passe par l'établissement de modèles qui substituent à la complexité du réel, un ensemble de données simplificatrices qui après traitement, permettent d'obtenir en sortie les valeurs de paramètres dont a besoin le planificateur. Par la suite, Il est nécessaire de définir les critères d'évaluation pour valider les résultats obtenus. Dans ce chapitre on présente les résultats concernant les heuristiques développées ainsi qu'une évaluation de ces résultats.

### 4.1 Implémentation

Avant de résoudre le modèle mathématique, nous avons développé une borne inférieure qui reprend les principaux éléments du modèle. Il s'agit de minimiser le coût d'installation du réseau de capteurs tout en localisant les mobiles installés aux positions par au moins  $n_{min}$  capteurs. Par contre, la borne inférieure ne tient pas en compte de la communication entre capteurs et par conséquent du routage entre ces capteurs. L'infaisabilité d'une solution dans le cas de la borne inférieure fait référence à l'impossibilité de localiser un ou plusieurs mobiles. Cela peut s'expliquer par :

- une atténuation forte entre les sites et la position du mobile ou,
- une puissance du signal du mobile trop faible ou encore,
- un mobile situé à une position donnée est détecté par un nombre de capteurs inférieur à  $n_{min}$ .

La plateforme employée pour résoudre le modèle mathématique est une machine Sun Java sous linux utilisant un processeur AMD Opteron 150 CPU et une mémoire RAM de 2GB. Nous avons utilisé le logiciel CPLEX 10.0 configuré avec les paramètres par défaut sauf pour le temps limite d'exécution qui a été fixé à 30 heures. L'algorithme utilisé par CPLEX est l'algorithme par séparation et évaluation (branch and bound). Il s'agit de fractionner le problème en sous problèmes et construire la solution au fur et à mesure. Une façon de représenter le problème est

de construire un arbre d'énumération dont chaque branche sortant d'un nœud donné représente une valeur d'une variable du problème. Étant donné qu'il est difficile de faire cette énumération lorsque le nombre de variables est important, il est primordial de définir des bornes pour ne pas exploiter l'arbre en entier.

La résolution de la borne inférieure a été faite aussi par le logiciel CPLEX. Du moment que cette borne inférieure ne prend pas en compte certaines contraintes qu'on a relâché, une solution réalisable peut ne pas l'être en réalité. Donc, cette borne inférieure sert à donner un ordre de grandeur ainsi qu'à évaluer la qualité de la solution proposée par la méthode de recherche avec tabous.

L'heuristique initiale, celle de la recherche avec tabous ou encore celle de diversification ont été implémentées par le langage C++. L'heuristique initiale a pour objectif de fournir une solution réalisable qui va être le point de départ de l'heuristique de recherche avec tabous et qui va parcourir l'espace de recherche en essayant de l'améliorer. Après un certain nombre d'itérations de stagnation ou encore après un certain temps pour la relance comme cela a été expliqué auparavant, l'heuristique de diversification servira encore comme un point de départ pour explorer d'autres régions estimées non explorées suffisamment. Ces heuristiques peuvent rencontrer des solutions non réalisables en analysant le coût en général très élevé à cause des pénalités attribuées au non-respect des contraintes. Cette solution reflète le degré de violation de ces contraintes. La solution va être présentée si elle n'a pas été améliorée à la fin de la recherche.

Le planificateur va choisir la solution qui réalise son objectif non nécessairement celle avec un coût minimal. Par exemple, dans certains cas, la meilleure solution peut avoir une proportion élevée de pénalités. Le planificateur peut aussi choisir de rejeter la solution proposée, et dans ce cas il doit :

- choisir d'autres sites potentiels pour lesquels les atténuations sont moins fortes,
- revoir les spécifications telles que réduire  $n_{min}$ , le nombre minimal de signaux pour localiser un mobile ou encore réduire  $h_{max}$ , le nombre maximal de sauts permis entre un capteur standard et un capteur complexe,

- choisir d'autres types de mobiles dont la puissance de communication est améliorée ou,
- choisir des capteurs avec de meilleures caractéristiques telles que la puissance minimale pour qu'un signal soit reçu.

L'esquisse de la méthodologie de résolution de notre modèle de positionnement proposé est présentée dans la figure suivante.

<b>Programme générateur d'exemplaires</b>	
<b>Entrées :</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nombre de sites potentiels</li> <li>• nombre de positions</li> <li>• caractéristiques des capteurs</li> <li>• nombre minimum de signaux pour localisation : <math>n_{min}</math></li> <li>• nombre maximal de sauts permis entre un capteur standard et un capteur complexe : <math>h_{max}</math></li> </ul>
<b>Sorties :</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• coordonnées des sites</li> <li>• coordonnées des positions</li> <li>• atténuations entre sites potentiels</li> <li>• atténuations entre sites potentiels et positions</li> </ul>

(A)

<b>Heuristique initiale</b>	
<b>Entrées :</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sorties du programme générateur d'exemplaires</li> </ul>
<b>Sorties :</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• coût du positionnement</li> <li>• coordonnées des sites choisis et capteurs à installer</li> </ul>

(B)

<b>Heuristique de recherche avec tabous de base et diversifiée</b>
<b>Entrées :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• sorties de l'heuristique initiale</li> </ul> <b>Sorties :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• coût du positionnement</li> <li>• coordonnées des sites choisis et capteurs à installer</li> </ul>

(C)

<b>Programme de calcul de la borne inférieure avec CPLEX</b>
<b>Entrées :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• sorties du programme générateur d'exemplaires</li> </ul> <b>Sorties :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• coût du positionnement</li> <li>• coordonnées des sites choisis et capteurs à installer</li> </ul>

(D)

Figure 4.1 : Entrées et sorties du programme. Générateur d'exemplaires (A), heuristique initiale (B), heuristique de recherche avec tabous de base (C) et diversifiée et programme de calcul de la borne inférieure (D)

## 4.2 Plan d'expériences

Nous avons testé et analysé plusieurs aspects de l'approche de positionnement des capteurs suivant les axes qu'on propose par ce plan d'expérience :

- évaluer la borne inférieure, l'heuristique initiale et l'algorithme de recherche avec tabous. Il s'agit d'observer l'évolution du coût d'installation du réseau de capteurs ainsi que l'évolution du temps d'exécution en faisant varier le nombre de positions pour mobiles, le nombre de sites potentiels.
- établir l'effet des paramètres de l'algorithme de recherche avec tabous sur le coût du positionnement. Il est question de mettre en valeur l'effet du choix du temps de relance pour faire une diversification.

- observer l'effet du nombre minimal de signaux pour la localisation (méthode de trilatération).
- comparer les coûts pour un environnement 2D et 3D.
- évaluer le nombre de sites ainsi que les types de capteurs à installer générés par la borne inférieure, l'heuristique initiale et l'algorithme de recherche avec tabous selon le nombre de positions pour mobiles, le nombre de sites potentiels et la surface de déploiement.
- observer la différence entre la moyenne du temps d'exécution de la borne inférieure sur CPLEX et celle du temps d'exécution de l'algorithme de recherche avec tabous diversifiée.

#### 4.2.1 Paramètres et données de simulation

Nous avons développé un programme en langage C qui permet de générer :

- les coordonnées des positions des mobiles et les puissances de transmission de ces mobiles,
- les coordonnées des sites potentiels pour installation des capteurs, les coûts d'installation des capteurs sur ces sites, ainsi que les coûts d'installation des différents types de capteurs,
- les atténuations du signal entre les sites potentiels ainsi qu'entre les positions et les sites.

Toutefois les paramètres sont :

- nombre de sites, nombre de positions en environnement 2D ou 3D,
- caractéristiques des capteurs : puissance de transmission, puissance minimale de reconnaissance du signal, coût d'achat et d'installation.

Nous avons généré une série de fichiers de tests. Le nombre de positions probables pour les mobiles (*CardI*) varie entre 20 et 1000, le nombre de sites potentiels (*CardJ*) est de 250 et le

nombre de types de capteurs est de 10 ( $CardT=10$  avec  $CardTs=8$  et  $CardTc=2$ , voir tableau 4.1). Les coordonnées en 2D sont comprises dans l'intervalle [1,500] mètres. Ci-après, les hypothèses concernant les constantes :

- Les capteurs sont choisis entre un ensemble de capteurs de différents fabricants en l'occurrence Crossbow Technology ([www.xbow.com](http://www.xbow.com)) et RF Monolithics, Inc ([www.rfm.com](http://www.rfm.com)). Ces capteurs permettent l'installation des applications pour un environnement ouvert (outdoor) et dont on peut résumer les caractéristiques comme suit :
  - la distance de couverture varie de 30 mètres (capteur du type IPR2410 par exemple) à 900 mètres (capteur du type WIT2410M4G par exemple) ([www.xbow.com](http://www.xbow.com) et [www.rfm.com](http://www.rfm.com)).
  - les fréquences varient dans l'intervalle 2400 MHz-2483.5 MHz pour des liaisons point-à-point à vue (LOS). La fréquence des capteurs a été fixée à 2400 MHz.
  - les puissances de transmission varient dans l'intervalle [3.9811E-03, 39.811] mW qui vont permettre de garantir la connectivité et,
  - les sensibilités de réception varient dans l'intervalle [7.9433 E-11, 1.5849E-09] mW et qui vont permettre de garantir la couverture et par conséquent la localisation.

Le tableau 4.1 présente les types de capteurs choisis et qui sont classés en type complexe (avec capacité de calcul)/type simple et caractérisés par la puissance de transmission, la sensibilité de réception et le coût.

- Les coûts  $c_j^t$  comprennent le coût du capteur de type  $t$  lui-même et un coût pénalité variant entre [1,100]\$ qui représente l'accessibilité du site potentiel  $j$ . Les coûts d'installation des capteurs qui peuvent comprendre le test de RF (Radio Frequency) de l'environnement du déploiement, installation et configuration des capteurs ainsi qu'une possible intégration à

un réseau de données existant sont fixés à 16\$ par capteur (selon une étude pour le déploiement des capteurs de température pour l'agence de protection de l'environnement américaine, Département Américain de l'Énergie [DAE], 2007) et qu'on pourrait additionner au coût total du positionnement.

- L'atténuation pour les communications STS (Sensor To Sensor communications) ou encore pour les communications STM (Sensor To Mobile communications) sont générées en fonction du modèle de propagation en espace libre (FSPL: Free Space Path Loss) où la puissance du signal est affectée par la diffusion géométrique de l'onde et qui décrit le cas idéal des conditions de propagation où il n'existe qu'un chemin de visibilité directe sans obstacle (LOS: Line Of Sight) entre l'émetteur et le récepteur. Elle est exprimée en décibels (dB) et est fonction de la distance (en Km) et de la fréquence d'opération (en MHz) et dont l'équation d'évaluation est la suivante (Janaswamy, 2001) :

$$FSPL = 20 \log_{10}(\text{distance}) + 20 \log_{10}(\text{fréquence}) + 32.44 \quad (4.1)$$

Cette formule est obtenue d'une dérivation de l'équation du modèle Friis Free Space Loss. Ce modèle a été utilisé pour évaluer la portée de transmission des RCSF (See, Abd-Alhameed, Hu & Horoshenkov, 2008) :

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{L (4\pi d)^2} \quad (4.2)$$

et tel que  $P_r$  est la puissance du signal reçu,  $P_t$  la puissance du signal transmis,  $G_t$  et  $G_r$  sont les gains linéaires des antennes de l'émetteur et du récepteur respectivement,  $L \geq 1$  et qui représente le facteur de perte du système indépendamment de la propagation,  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $d$  est la distance séparant l'émetteur et le récepteur. Mais pour les antennes isotropes (cas idéal) on a  $G_t = G_r = 1$ , ce qui donne :

$$FSPL(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_t}{P_r} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{L(d4\pi)^2}{G_t G_r \lambda^2} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{(d4\pi)^2}{\lambda^2} \right) \quad (4.3)$$

La formule (4.3) retravaillée permet de retrouver la formule (4.1).

- Les puissances des mobiles sont générées aléatoirement dans l'intervalle [1,100] mW (la variation exprime la puissance du mobile qui peut être affectée par les perturbations de la charge de la batterie ou encore de l'émetteur-récepteur). Les normes autorisent des puissances jusqu'à 2 W pour les mobiles 2G et jusqu'à 250 mW pour les mobiles 3G. La fréquence d'opération des mobiles a été fixée aussi à 2400 MHz (900 MHz, 1800 MHz et 1900 MHz pour les mobiles 2G ; 1885 MHz-2025 MHz et 2110 MHz-2200 MHz pour les mobiles 3G; Union Internationale des Télécommunications [UIT]).
- On a fixé le nombre minimum de signaux pour la localisation  $n_{min}$  à trois signaux, ce qui correspond au nombre de signaux pour la trilatération.
- La pénalité  $\theta_1$  qui sert à exprimer le degré de violation de la contrainte (3.3) du modèle (localisation des mobiles) a été fixé à 1000 (suite aux tests préliminaires et qui dépend du coût de la solution engendrée) ainsi que pour la pénalité  $\theta_2$  et qui sert à exprimer le degré de violation des contraintes (3.13) et (3.14) du modèle (le nombre de sauts minimum entre un capteur simple et un capteur complexe).
- Des tests préliminaires ont permis d'établir les paramètres de l'algorithme de recherche avec tabous. : la taille de la liste taboue a été fixée à 50 et le nombre d'itérations sans amélioration pour passer à la phase de diversification à 10 itérations.



Tableau 4.1 : Caractéristiques ainsi que les coûts des types de capteurs choisis

	Type du capteur	Nom commercial	Puissance de transmission minimale (mW)	Sensibilité de réception maximale (mW)	Coût(\$)
<b>Capteurs complexes</b>	<b>ZMN2430HP</b>	ZMN2430HP de RFM	3,9811E+01	3,1623E-10	35
	<b>WIT2410M4G</b>	WIT2410 de RFM	1,0000E+01	5,0119E-10	259
<b>Capteurs simples</b>	<b>WIT2450M2</b>	WIT2450M2 de RFM	1,0000E+01	6,3096E-10	125
	<b>WIT2411D</b>	WIT2411D de RFM	1,0000E+01	1,5849E-09	254
	<b>XDM2140</b>	SmartMesh-XD de RFM	6,3096E+00	1,0000E-09	84
	<b>XM2110</b>	IRIS de Crossbow	1,9953E+00	7,9433E-11	132
	<b>MPR2600</b>	MICAz édition OEM de Crossbow	1,0000E+00	1,0000E-09	114
	<b>LPR2400</b>	LPR2400 de RFM	5,0119E-01	6,3096E-10	35
	<b>TPR2420</b>	TelosB de Crossbow	3,9811E-03	1,0000E-09	114
	<b>IPR2410</b>	Imote2 de Crossbow	3,9811E-03	3,9811E-10	114

### 4.3 Résultats et analyses

Nous allons reprendre dans cette partie les éléments du plan d'expérience. L'on peut souligner que :

- la valeur de la fonction objectif ainsi que la solution donnée par CPLEX et par la recherche avec tabous diversifiée coïncident dans la plupart des cas où CPLEX s'arrête avant d'atteindre le temps limite d'exécution fixé à 30 heures et surtout pour les grandes instances (voir figure 4.3 ).
- pour des instances larges, CPLEX affiche un « Out of Memory » (OM) avant d'atteindre le temps limite (voir tableau 4.3).
- dans la plupart des cas, la recherche avec tabous permet d'approcher la solution optimale avant d'entrer dans la phase de la diversification (voir figure 4.2).
- dans certains cas, la solution obtenue avec l'heuristique initiale ou avec le mouvement le moins fréquent et complétée par l'heuristique initiale (solution obtenue par diversification) est retournée par le processus de recherche avec tabous diversifiée. En d'autres termes, la solution initiale ou encore la solution diversifiée constituent parfois la solution optimale.
- Dans la plupart des tests réalisés, les contraintes de connectivité et par conséquent celles en relation avec le routage de messages et  $h_{max}$  (le nombre maximum de sauts entre un capteur simple et un capteur complexe) ne sont pas violées du moment que la sensibilité des capteurs choisis pour les simulations est grande. Cela implique que les nœuds peuvent communiquer directement par des liaisons point à point (voir figure 4.3).

### 4.3.1 Évolution de la valeur de la fonction objectif obtenue avec l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée selon le nombre de positions

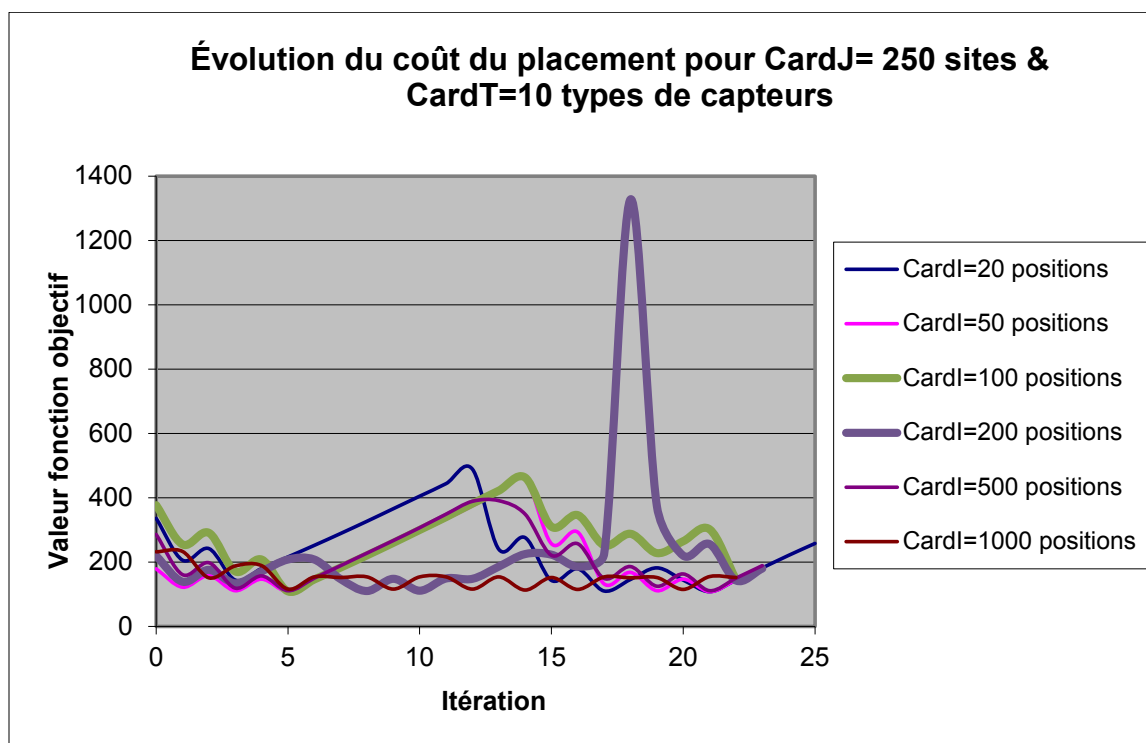


Figure 4.2 : Évolution du coût du placement obtenu avec l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels

D'après la figure 4.2, l'évolution dans l'espace de recherche a la même tendance indépendamment du nombre de positions que l'on a fait varier entre 20 et 1000 positions pour mobiles. On observe des pics qui reflètent le coût de la solution après diversification (qui est générée après un nombre d'itérations sans amélioration égal à 10 ; réglé après des tests préliminaires) et qui est dû soit à l'installation d'un plus grand nombre de capteurs ou à de grandes pénalités appliquées à la solution.

Prenons par exemple l'instance avec 1000 positions et 250 sites potentiels. L'heuristique initiale a permis de donner une configuration de 3 capteurs de type ZMN2430HP (voir les caractéristiques au tableau 4.1) sur 3 sites différents parmi les 250 sites potentiels avec un coût

total égal à 196\$ et qui sera le point de départ du processus de recherche avec tabous. Le passage d'une configuration donnée à une autre (ensemble de sites choisis ainsi que les types de capteurs à installer) se fait en évaluant le rapport : nombre de positions à couvrir/coût de couverture. La solution retournée par l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée est composée de 3 sites pour lesquels on doit installer des capteurs de type LPR2400 (voir tableau 4.1) avec un coût total de l'ordre de 113\$.

#### 4.3.2 Évolution de l'heuristique initiale, l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée et la borne inférieure selon le nombre de positions

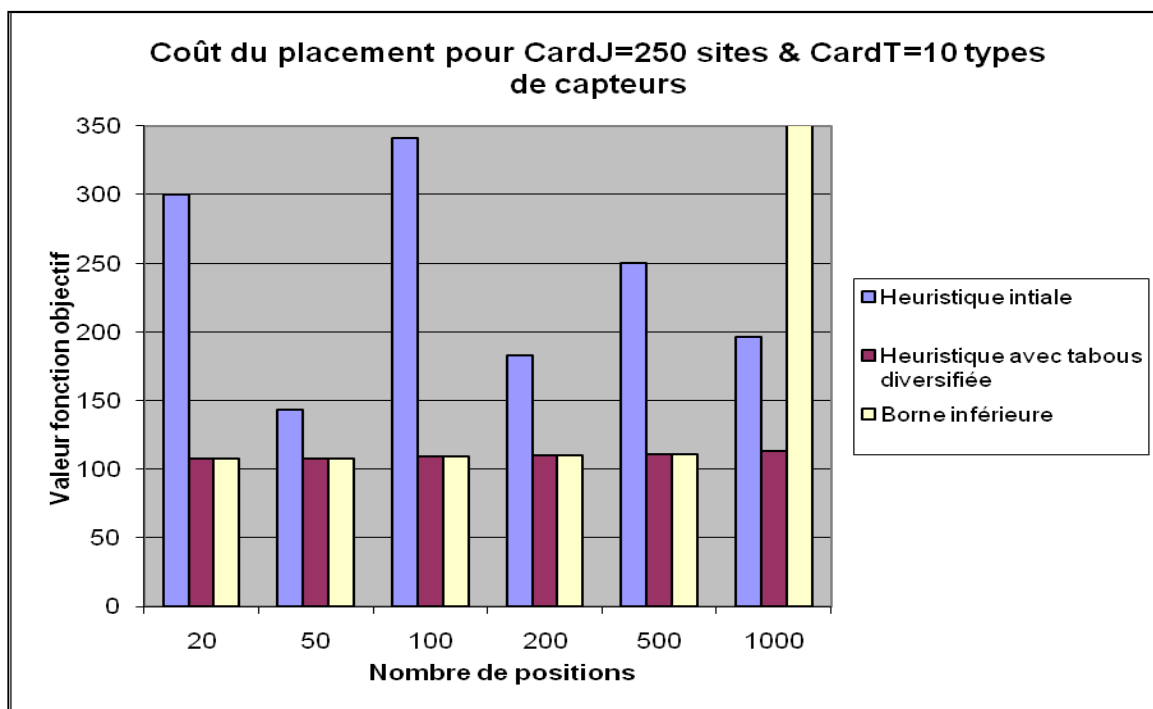


Figure 4.3 : Coût du placement pour 250 sites potentiels

Dans la figure 4.3, on peut rapporter la différence entre l'heuristique initiale et l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée. Rappelons que l'heuristique initiale a pour objectif de minimiser le coût d'installation des capteurs tout en recouvrant les positions des mobiles et cela en utilisant des capteurs de même type. Dans le cas d'instances avec un nombre petit ou très

grand de positions, on peut constater un écart qui peut aller jusqu'à 49% en moyenne, entre la solution initiale et la solution générée par la recherche avec tabous diversifiée. En effet, on peut observer que les sites ainsi que les capteurs à installer choisis par l'heuristique initiale ne coïncident pas avec ceux choisis par la recherche avec tabous diversifiée. Cependant la recherche avec tabous converge rapidement après un nombre réduit d'itérations (11 itérations en moyenne).

En ce qui concerne la comparaison entre la borne inférieure et la recherche avec tabous diversifiée, il faut noter que la borne inférieure ne donne pas de solutions (CPLEX affiche un «Out of Memory») pour un très grand nombre de positions (à partir de 1000 positions).

#### 4.3.3 Évolution du temps d'exécution de l'heuristique initiale, l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée et la borne inférieure selon le nombre positions

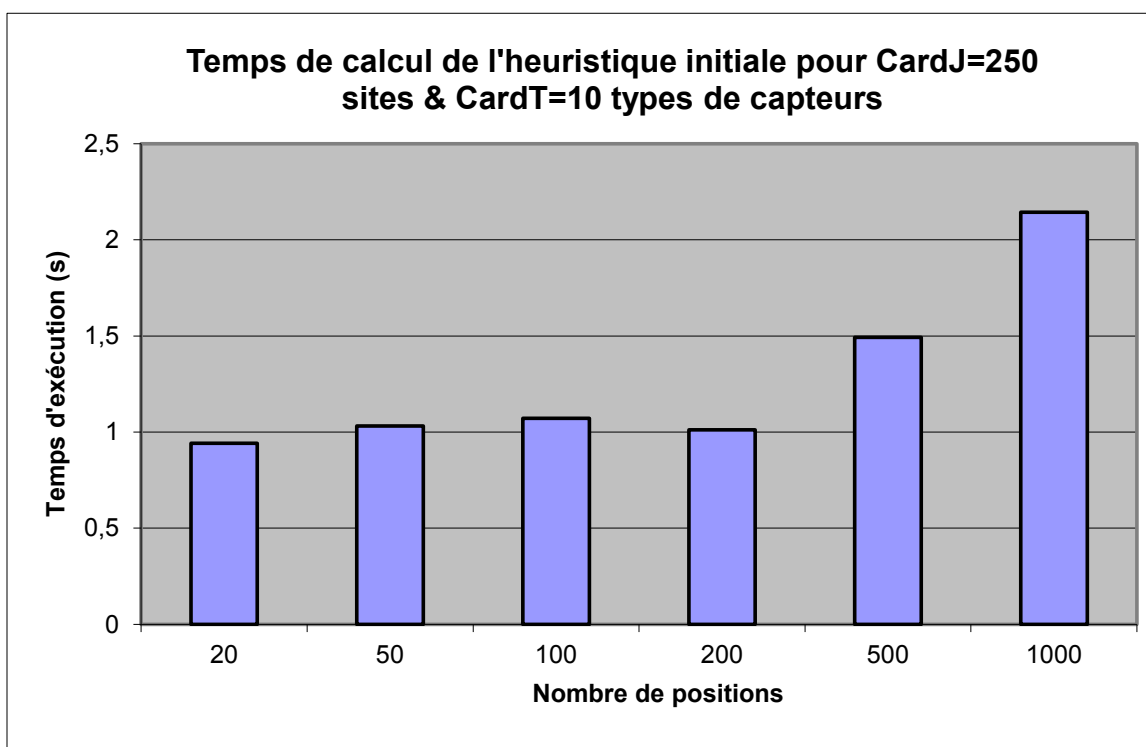


Figure 4.4 : Temps de calcul de l'heuristique initiale pour 250 sites potentiels

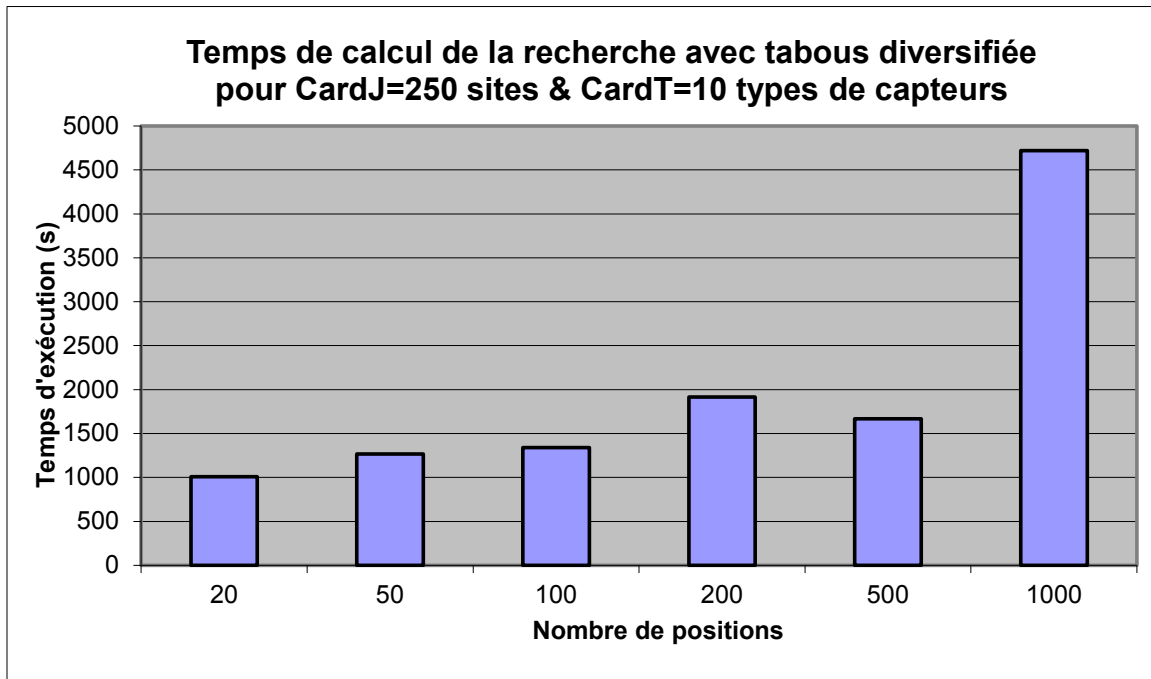


Figure 4.5 : Temps de calcul de l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels

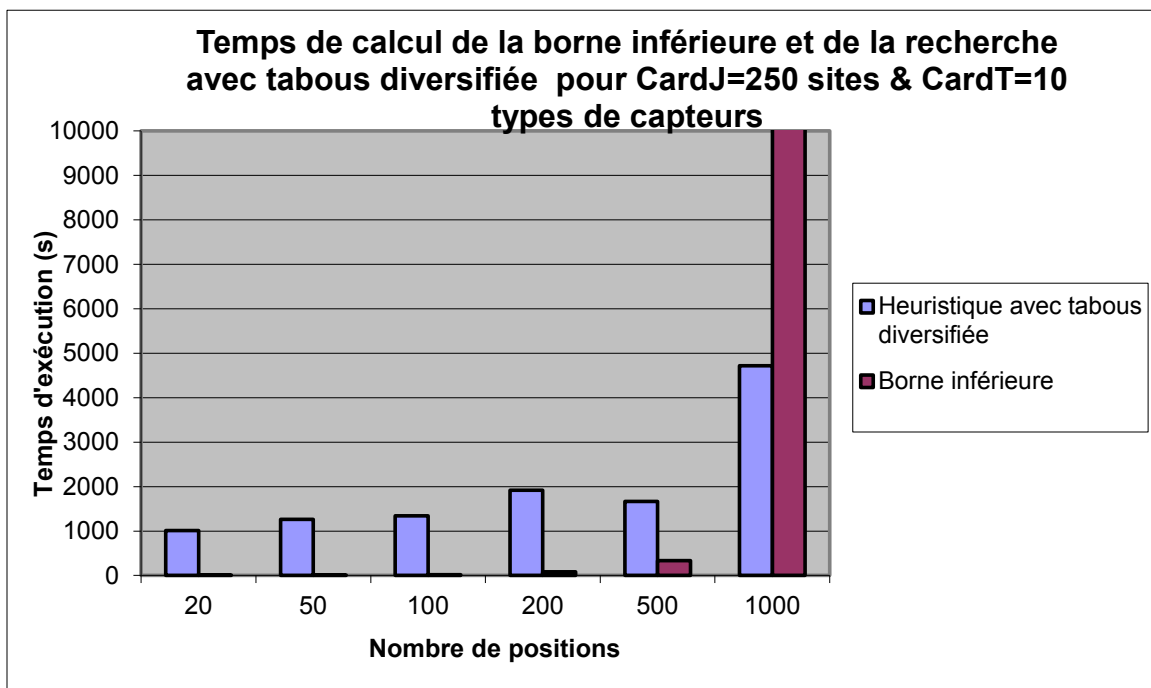


Figure 4.6 : Temps de calcul de la borne inférieure pour 250 sites potentiels

On remarque d'après les figures ci-haut (4.4-4.6) que le temps d'exécution de l'heuristique initiale est de l'ordre de quelques secondes indépendamment du nombre de positions. En ce qui concerne la borne inférieure, le temps d'exécution est exponentiel même s'il reste meilleur pour les instances avec un nombre de positions réduit (moins de 1000 positions). L'évolution du temps d'exécution de la recherche avec tabous diversifiée est polynomiale.

#### 4.3.4 Évolution de la valeur de la fonction objectif selon le temps de relance

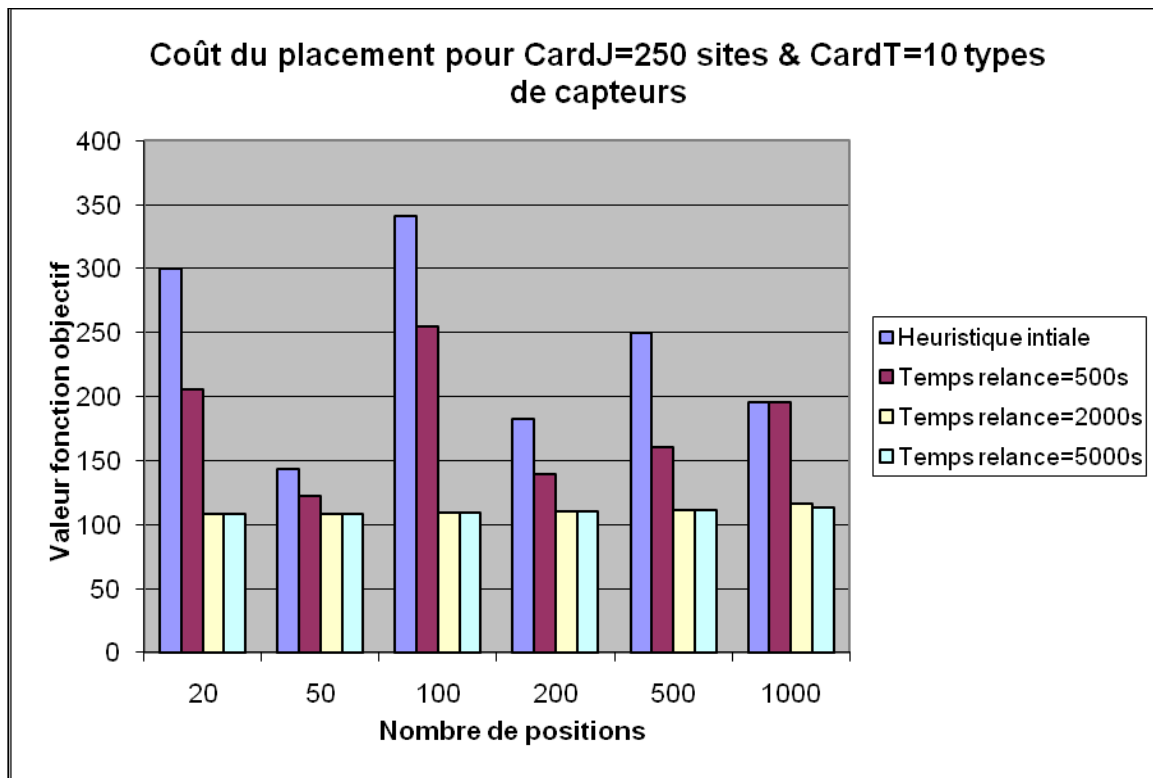


Figure 4.7 : Coût du placement obtenu avec l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels

D'après la figure ci-haut, on remarque que la valeur de l'heuristique avec tabous diversifiée est améliorée graduellement en fonction du temps de relance. Ces temps de relance qui varient entre 500 et 5000 secondes ont été choisis afin de mieux observer l'amélioration progressive du choix de la meilleure solution.

#### 4.3.5 Évolution du temps d'exécution de l'heuristique initiale, l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée et la borne inférieure selon le nombre minimum de signaux pour la localisation

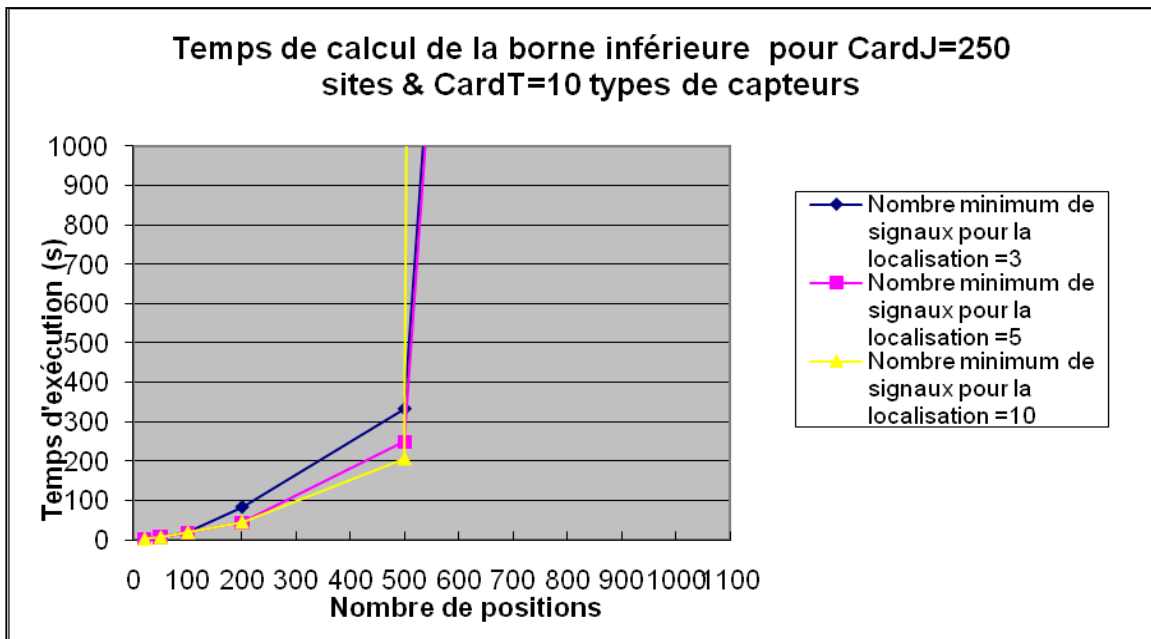


Figure 4.8 : Temps de calcul de la borne inférieure pour 250 sites potentiels

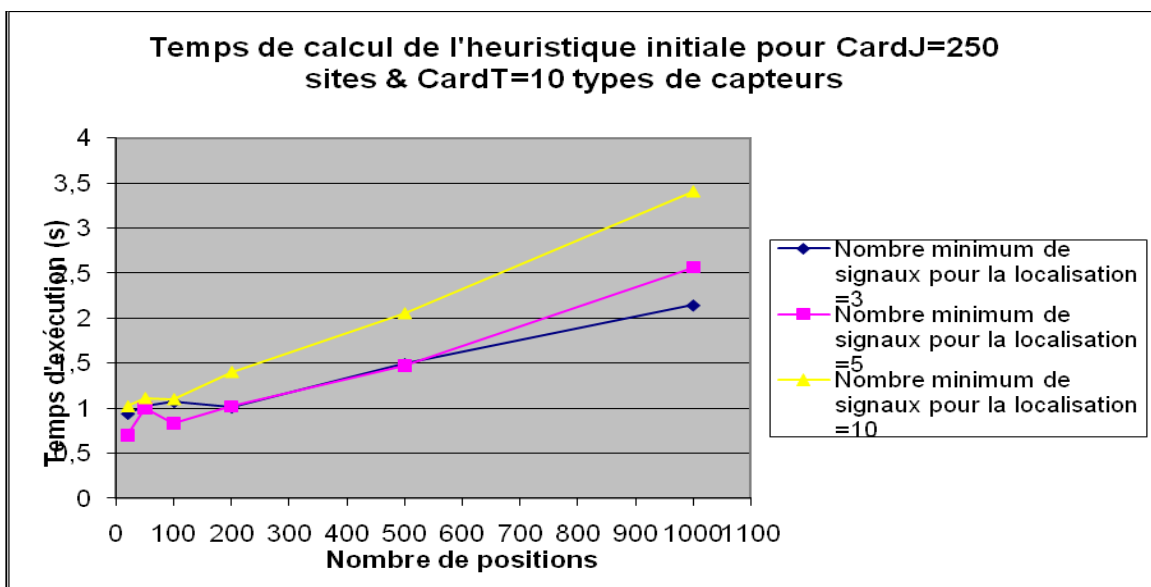


Figure 4.9 : Temps de calcul de l'heuristique initiale pour 250 sites potentiels



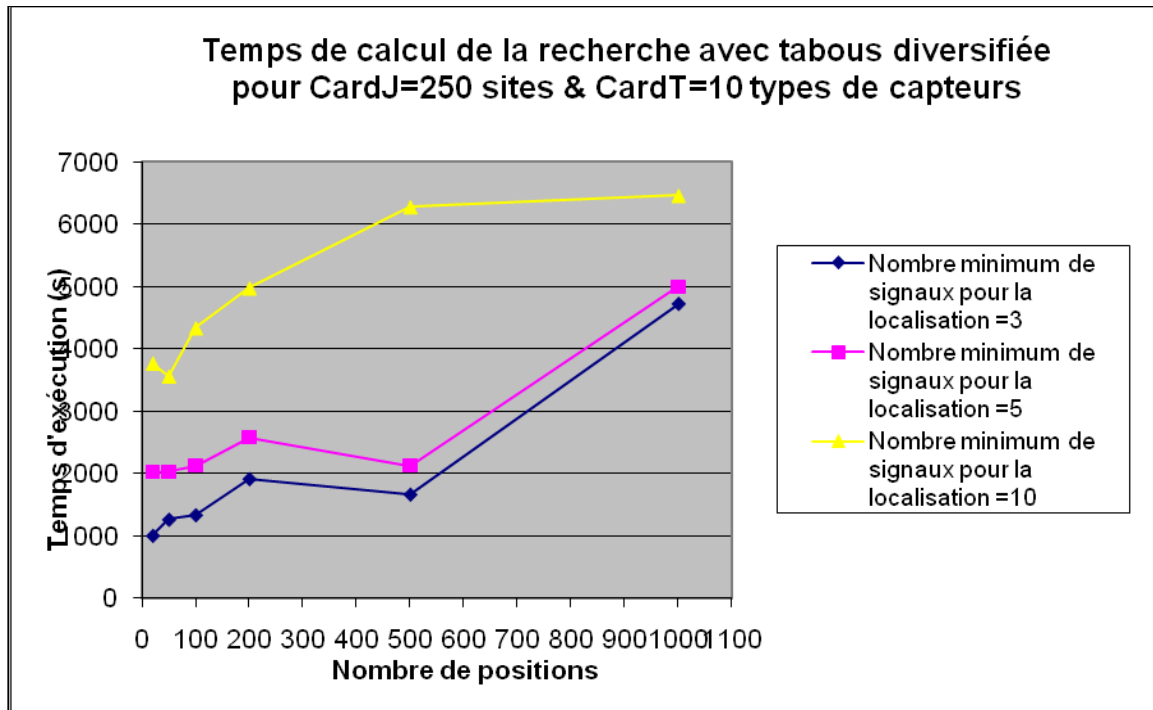


Figure 4.10 : Temps de calcul de l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels

D'après les courbes ci-haut, on peut observer que :

- le temps d'exécution de la borne inférieure est exponentiel.
- le temps d'exécution de l'heuristique initiale ainsi que celle avec tabous diversifiée croît dépendamment du nombre de positions et augmente selon le nombre minimum de signaux pour la localisation.

#### 4.3.6 Évolution du coût du placement généré par l'heuristique initiale, l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée et la borne inférieure selon le nombre minimum de signaux pour la localisation

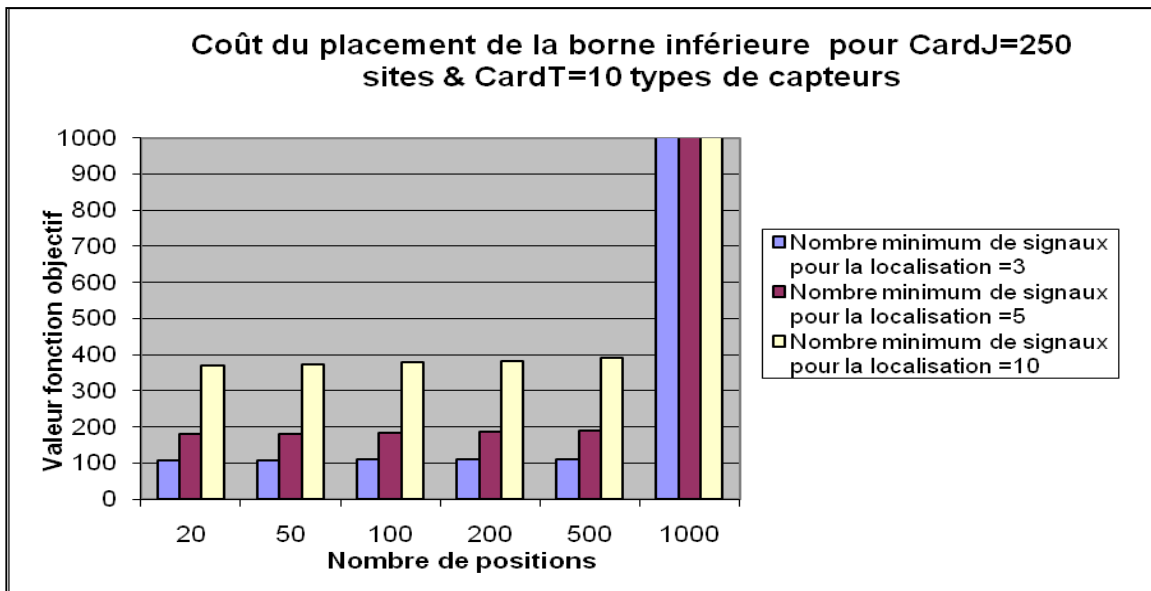


Figure 4.11 : Coût du placement généré par la borne inférieure pour 250 sites potentiels

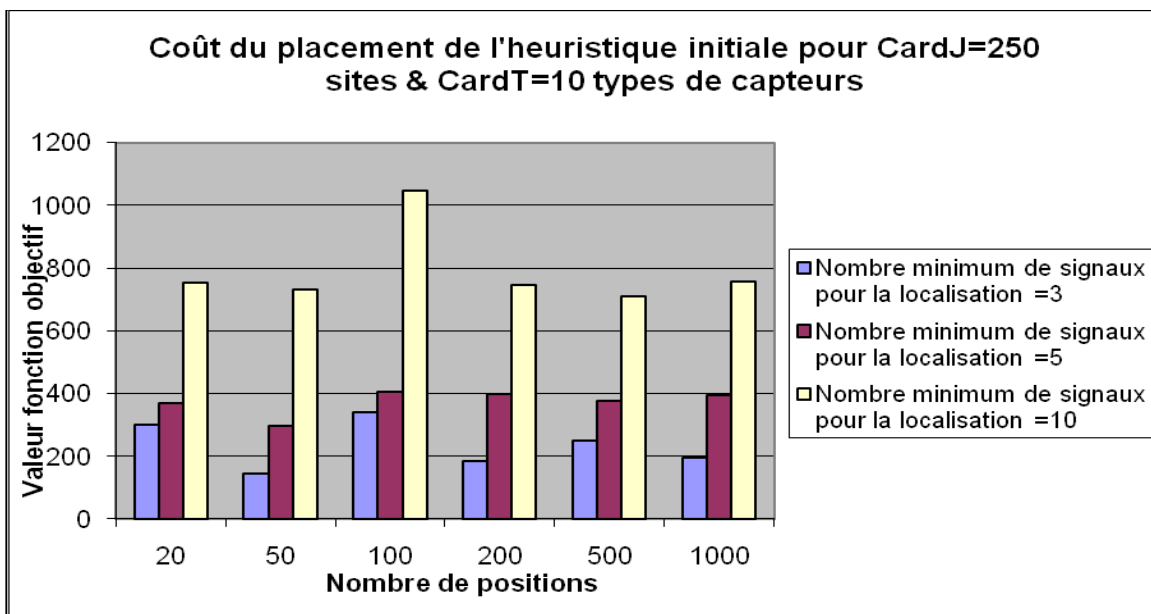


Figure 4.12 : Coût du placement généré par l'heuristique initiale pour 250 sites potentiels

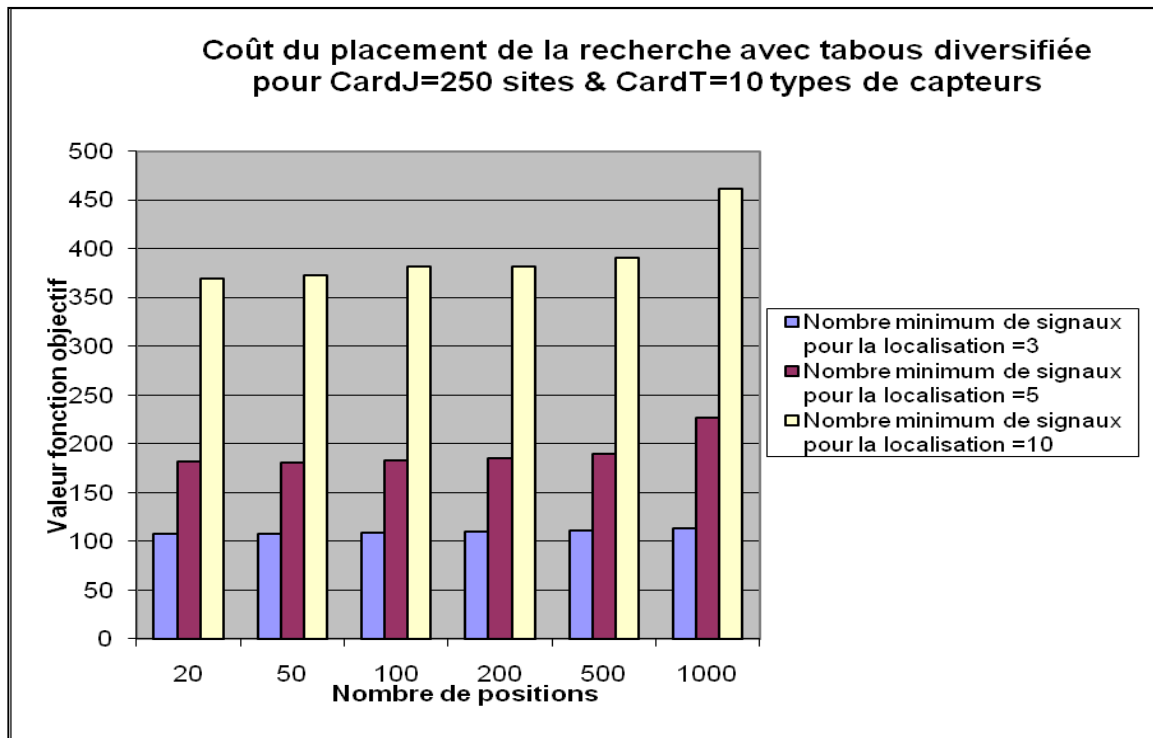


Figure 4.13 : Coût du placement généré par l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels

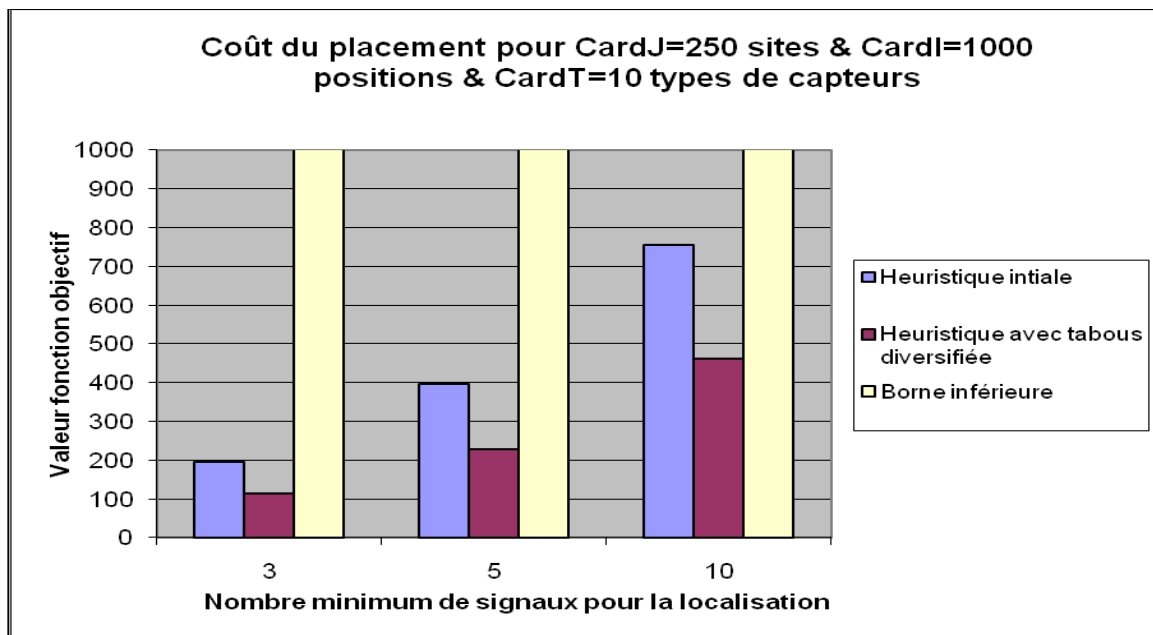


Figure 4.14 : Coût du placement pour 250 sites potentiels et 1000 positions

On remarque d'après les figures ci-haut que les coûts engendrés par l'heuristique initiale et celle de recherche avec tabous diversifiée croient d'une manière linéaire suivant le nombre minimum de signaux pour la localisation. Cela est justifié par l'installation d'un plus grand nombre de capteurs dépendamment du nombre minimum de signaux pour la localisation. On peut constater aussi que la différence entre le coût de la solution de l'heuristique initiale et celui fourni par l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée croit d'une manière linéaire dépendamment du nombre minimum de signaux pour la localisation, tandis que la borne inférieure n'a pas permis de calculer la solution avant d'atteindre le temps limite (CPLEX affiche un «Out of Memory»). Aussi, le coût de la solution engendrée par la recherche avec tabous affiche une amélioration moyenne de l'ordre de 49% par rapport à l'heuristique initiale et ceci indépendamment du nombre minimum de signaux pour la localisation (même résultat donné par la figure 4.3).

#### **4.3.7 Évolution du coût du placement généré par l'heuristique initiale, l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée et la borne inférieure selon le type d'environnement 2D ou 3D**

Dans un environnement 3D, les atténuations pour les communications STS (Sensor-To-Sensor communications) ou encore pour les communications STM (Sensor-To-Mobile communications) sont générées en fonction du modèle de propagation COST231-Walfish-Ikegami pour une situation de NLOS (Non Line Of Sight). Le choix se justifie par le fait que les autres modèles de propagation tels que Okumura, Hata et COST231 supposent que la hauteur de la station de base soit de 30 m ou encore la distance maximale soit de 1 Km (Armes, 2007). Ce modèle est une combinaison de modèles empiriques et déterministes et utilise quatre paramètres pour décrire la propagation dans un milieu urbain : la hauteur des bâtiments, la largeur des routes, l'espace entre bâtiments et enfin le sens d'orientation des rues. La propagation est exprimée en décibels (dB) et dont l'équation d'évaluation est la suivante (Janaswamy, 2001) :

$$\begin{aligned}
 L &= L_0 + L_{rts} + L_{msd} & L_{rts} + L_{msd} &\geq 0 \\
 L &= L_0 & L_{rts} + L_{msd} &< 0
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

et où

$L_0$  : est la propagation en espace libre

$L_{rts}$  : perte par diffraction du toit vers la rue

$L_{msd}$  = perte par diffraction multi-masques.

Dans le cas où il n'y a pas données pour la structure des bâtiments et des routes, on peut utiliser les valeurs des paramètres résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4.2 : Paramètres du modèle de propagation COST231-Walfish-Ikegami

Paramètre	Intervalle Valeurs	de Valeurs simulations	pour
$b$ : Séparation entre les bâtiments en mètres	20 -50	20	
$w$ : Largeur de la voie en mètres	$b/2$	10	
$h_r$ : Hauteur du toit en mètres	3	3	
$\varphi$ : Angle formé par le capteur et la station de base en degré	90	90	
fréquence : Fréquence d'opération en MHz	800-2000	2400	
$h_b$ : Hauteur de l'antenne de la station de base en mètres	4-50	50	
$h_m$ : Hauteur de l'antenne du capteur en mètres	1-3	1	
distance : Distance entre la station de base et le capteur en kilomètres	0.02-5	-	

Ainsi les formules peuvent se réécrire comme suit :

- pour la propagation en espace libre :

$$L_0 = 20 \log_{10}(\text{distance}) + 20 \log_{10}(\text{fréquence}) + 32.44 \quad (4.5)$$

- pour la perte par diffraction du toit vers la rue :

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(\text{fréquence}) + 20 \log_{10}(h_r - h_m) + L_{ori} \quad (4.6)$$

avec:

$$L_{ori} = 4 - 0.114(\phi - 55) \quad (4.7)$$

et où

$L_{ori}$  : facteur de correction empirique prenant en compte l'orientation de rue.

$w$  : largeur de rue en mètres.

$\phi$  : angle d'incidence du trajet direct radio par rapport à l'orientation de la rue.

- pour la perte par diffraction multi-masques.

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d \log_{10}(\text{distance}) + K_f \log_{10}(\text{fréquence}) - 9 \log_{10}(b) \quad (4.8)$$

avec:

$$L_{bsh} = -18 \log_{10}(1 + h_b - h_r) \quad (4.9)$$

$$K_a = 54 \quad (4.10)$$

$$K_d = 18$$

$$K_f = -4 + 0.7 * (\text{fréquence} / 925 - 1) \quad (4.11)$$

et tel que :

$L_{bsh}$  : facteur de correction de l'atténuation relatif à la hauteur de l'antenne de la station de base par rapport au toit.

$K_a$  : facteur de correction de l'atténuation relatif à l'augmentation de l'atténuation pour les antennes de la station de base de basse hauteur,

$K_d$  : facteur de correction relatif au rapport diffraction multi masques/ distance,

$K_f$  : facteur de correction relatif au rapport diffraction multi masques / fréquence.

La figure suivante représente les résultats obtenus. En général, les coûts pour un environnement 3D sont un peu élevés par rapport à ceux pour l'environnement 2D étant donné qu'on doit installer des capteurs avec une sensibilité plus élevée et ainsi de coût plus élevé pour couvrir les positions du moment que l'atténuation de la propagation avec le modèle utilisé dans un environnement 3D est plus élevée que celle dans un environnement 2D.

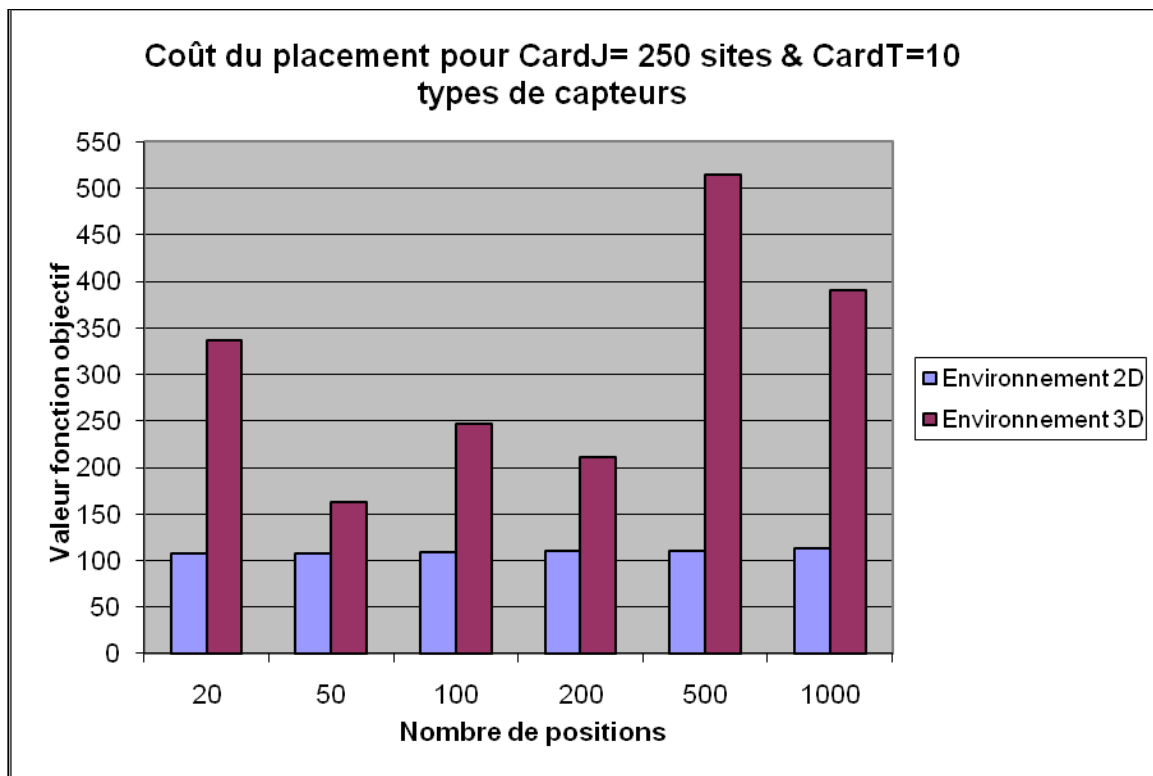


Figure 4.15 : Coût du placement obtenu avec l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels

#### 4.3.8 Évaluation du coût du placement, du nombre de sites ainsi que des types de capteurs à installer générés par l'heuristique initiale, l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée et la borne inférieure selon la surface à couvrir

Nous avons généré une série de fichiers de tests et dont les coordonnées des positions ainsi que des sites varient de [1,500] à [1,10000] mètres (surface allant de 0,25 Km<sup>2</sup> à 100 Km<sup>2</sup>). Le graphique de la figure 4.16 permet de conclure que le coût de placement augmente en fonction du nombre de positions et en fonction aussi de la surface à couvrir exprimée en Km<sup>2</sup>. De même, le graphique de la figure 4.17 permet de déduire que le coût de la solution fourni avec l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée est plus grand que celui fourni avec la borne inférieure et



cela est dû à la prise en considération de la contrainte de connectivité et par conséquent le routage de messages et le nombre maximum de sauts entre un capteur simple et un capteur complexe ( $h_{max}$ ). On peut noter que l'heuristique initiale génère des solutions non faisables (solutions avec de grandes pénalités). Pour les instances avec 1000 positions (pour lesquelles CPLEX affiche un « Out of Memory »), l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée permet de fournir une solution optimale en un temps raisonnable.

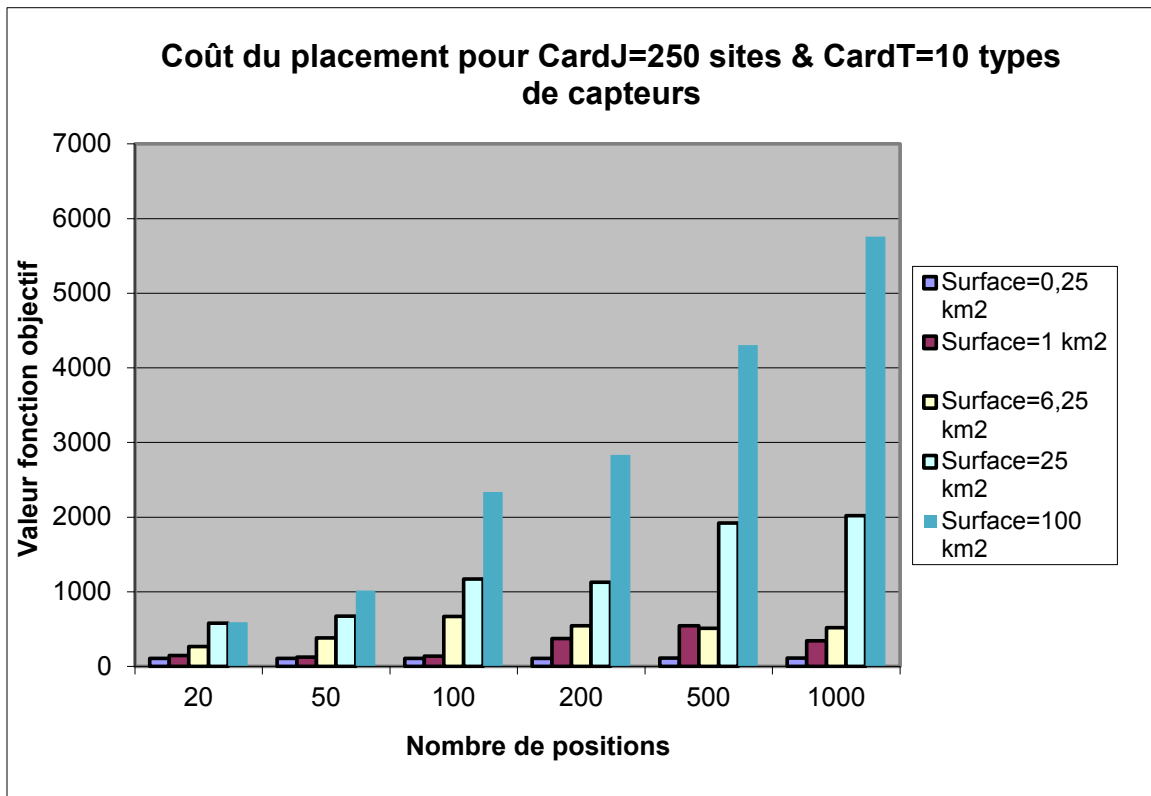


Figure 4.16 : Coût du placement obtenu avec l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels

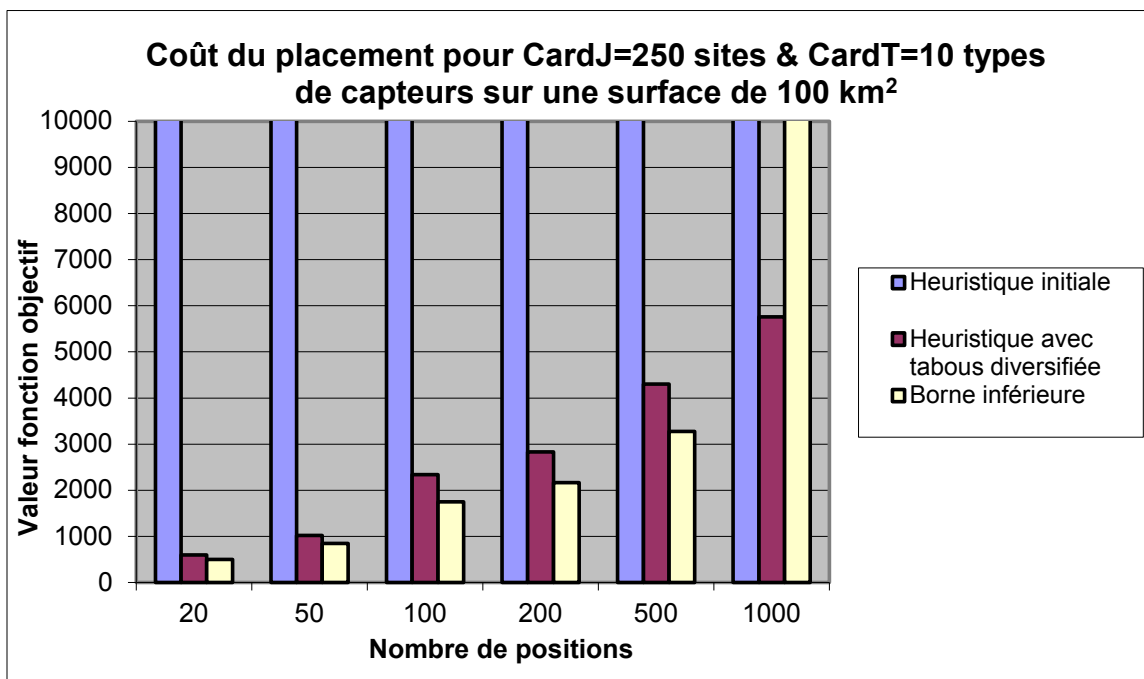


Figure 4.17: Coût du placement pour 250 sites potentiels

Et dans la figure 4.18, nous avons essayé de représenter les types de capteurs à installer pour les configurations retournées par l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée (dont le coût du placement est représenté dans la figure 4.17). On peut observer que les types de capteurs fournis par la solution sont du type XM2110 (capteur simple) et ZMN2430HP (capteur complexe) (voir tableau 4.1). Par exemple avec 1000 positions, l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée engendre une solution composée de 35 sites pour lesquels on aura à installer des capteurs répartis comme suit : des capteurs de type XM2110 sur 34 sites (97,14%) et des capteurs de type ZMN2430HP sur 1 site (2,85%). Le choix des capteurs se fait selon le rapport : sensibilité de réception/coût. S'il y a lieu d'installer des capteurs complexes, les capteurs de type ZMN2430HP (voir tableau 4.1) sont choisis par la solution.

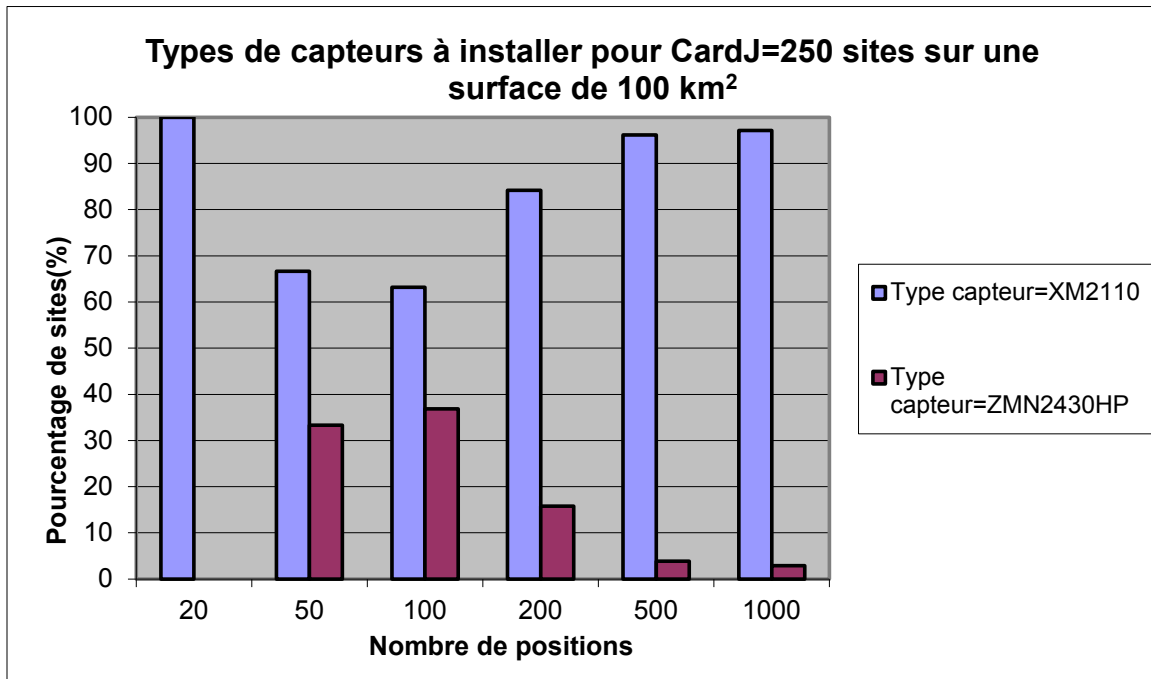


Figure 4.18: Répartition des types de capteurs à installer obtenu par l’heuristique de recherche avec tabous diversifiée pour 250 sites potentiels

#### 4.3.9 Évaluation du coût du placement généré par la borne inférieure et celui généré par l’heuristique de recherche avec tabous diversifiée

La série de tests du plan d’expérience a permis aussi de dresser le tableau suivant et concerne le coût de la meilleure solution de la borne inférieure (obtenue avec CPLEX) ainsi que celui de l’heuristique avec tabous diversifiée (RTD) et l’écart moyen des coûts. On peut constater que l’écart est plus grand pour des instances pour couvrir des surfaces plus vastes. En effet, la différence qui varie entre 0% et 46,27% (la moyenne des écarts moyens est de l’ordre de 19,96% et l’écart moyen sur une surface de 100 Km<sup>2</sup> est de l’ordre de 21,01% par exemple) sert à garantir la connectivité entre les nœuds du schéma de déploiement généré par l’heuristique de recherche avec tabous diversifiée ainsi qu’un routage optimal en respectant les contraintes (3.13) et (3.14) de notre modèle mathématique.

Tableau 4.3 : Coût du placement et écart moyen du coût du placement généré par la borne inférieure et l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée avec 10 types de capteurs

Surface à couvrir	Nombre de positions (CardI)	Nombre de sites potentiels (CardJ)	Coût moyen de la RTD	Coût moyen de la borne inférieure	Écart Moyen (%)
<b>Surface = 0,25 Km<sup>2</sup></b>	20	250	108	108	0,000
	50	250	108	108	0,000
	100	250	109	109	0,000
	200	250	110	110	0,000
	500	250	111	111	0,000
	1000	250	113	OM	-
<b>Surface = 1 Km<sup>2</sup></b>	20	250	146	122	16,44
	50	250	124	115	7,26
	100	250	138	108	21,74
	200	250	373	241	35,39
	500	250	544	399	26,65
	1000	250	346	OM	-
<b>Surface = 6,25 Km<sup>2</sup></b>	20	250	268	144	46,27
	50	250	385	255	33,77
	100	250	668	432	35,33
	200	250	547	355	35,10
	500	250	513	477	7,02
	1000	250	518	OM	-
<b>Surface = 25 Km<sup>2</sup></b>	20	250	582	386	33,68
	50	250	675	469	30,52
	100	250	1171	822	29,80
	200	250	1130	946	16,28
	500	250	1922	1564	18,63
	1000	250	2021	OM	-
<b>Surface = 100 Km<sup>2</sup></b>	20	250	595	502	15,63
	50	250	1019	847	16,88
	100	250	2339	1753	25,05
	200	250	2835	2165	23,63
	500	250	4303	3276	23,87
	1000	250	5758	OM	-
<b>Moyenne des écarts moyens (%)</b>					<b>19,96</b>

## 4.4 Conclusion

D'après les résultats obtenus à partir des simulations conduites, nous pourrions dire que les résultats convergent vers les prédictions concernant le modèle ainsi que les heuristiques proposées.

- La recherche avec tabous et la borne inférieure donnent un écart moyen de l'ordre de 19,96% (relatif aux instances pour les quelles CPLEX fournit la borne inférieure) et ceci garantit les propriétés de couverture et de connectivité du réseau de capteurs sans fil à installer indépendamment des surfaces à couvrir. Cela est justifié par le fait que la sensibilité des capteurs est très élevée même en présence d'atténuations fortes (modélisées par exemple par le modèle de propagation en espace libre (Free Space Path Loss)). Aussi, on peut dire que l'écart observé concerne la garantie de la connectivité et du routage du moment que la borne inférieure proposée ne tient pas en compte de ces contraintes.
- L'évolution du coût d'installation ainsi que du temps d'exécution d'un réseau de capteurs sans fil selon le nombre minimal de signaux pour la localisation.
- Le déploiement dans un environnement 3D engendre un coût de réseau élevé car on rencontre des atténuations plus fortes que dans un environnement 2D.

Donc ces résultats prouvent la qualité du modèle proposé et ainsi la démarche adoptée pour la planification répond aux objectifs fixés.

## **CHAPITRE 5      CONCLUSION**

La grande expansion des systèmes sans fil témoigne d'un brillant avenir des réseaux de capteurs sans fil comme étant des systèmes indépendants ou intégrés à d'autres infrastructures. En effet, ils ont su capturer l'attention des média ainsi que l'imagination du public. Par contre, beaucoup d'enjeux technologiques sont à étudier pour concevoir des réseaux robustes et performants supportant les applications émergentes. L'un de ces enjeux est la planification de ce genre de réseaux et qui reste l'objectif de ce travail. Ce chapitre présente une synthèse du travail réalisé ainsi que les critiques de la démarche entreprise sans oublier de tracer de nouvelles voies pour la planification des réseaux de capteurs sans fil.

### **5.1 Synthèse des travaux**

Dans le chapitre introduction, nous avons commencé par cerner le contexte du mémoire. En effet, les réseaux de capteurs sans fil offrent des solutions attrayantes mais soulèvent des défis à cause de leurs flexibilités. Une présentation des objectifs a été faite avant d'exposer la démarche à entreprendre pour la planification de ce type de réseaux. Nous avons consacré le deuxième chapitre pour les réseaux de capteurs : les composantes, le fonctionnement, les applications et aussi les défis de recherche. Ensuite, une synthèse de l'étude bibliographique sur les solutions de déploiement a permis de recenser plusieurs restrictions pour les travaux étudiés. Ces restrictions nous ont amenées à proposer une technique pour réaliser une couverture et une connectivité basées sur des hypothèses réalistes de la propagation du signal. Cette technique introduit un modèle mathématique qui permet de traduire les contraintes ainsi que les objectifs précédemment fixés. Pour implémenter le modèle nous avons proposé d'abord une heuristique initiale pour fournir une solution pas nécessairement optimale et qui va servir comme point de départ pour une heuristique de recherche avec tabous diversifiée. Nous avons proposé aussi une solution borne inférieure calculée à partir d'une relaxation de certaines contraintes du modèle mathématique. Pour estimer et analyser la validité du modèle, nous avons procédé à l'élaboration d'un plan d'expériences. Les simulations réalisées ont permis de prouver la qualité du modèle proposé et par conséquent l'approche de planification adoptée. En effet, le temps d'exécution de l'heuristique initiale ne dépasse pas 3 secondes même pour les grandes instances. En ce qui

concerne l'heuristique de recherche avec tabous diversifiée, elle génère des solutions après un temps d'exécution raisonnable même pour des grandes instances (4718 sec pour des instances de 250 sites et 1000 positions sur une surface de 500\*500 mètres par exemple).

## 5.2 Limitations des travaux

À travers ce travail, on a pu démontrer que le modèle élaboré est valide mais on peut ressortir plusieurs critiques pour certains aspects de la propagation des signaux et que pour des soucis de simplification ont été abandonnés :

- les interférences des signaux propagés et des fréquences d'opération aussi bien des mobiles que des capteurs n'ont pas été modélisées.
- la direction des antennes de l'émetteur et du récepteur qui peut avoir des effets sur la propagation des signaux et ainsi sur les communications STM ou STS et par la même occasion sur la couverture et la connectivité à garantir.

Et pour démontrer l'optimalité de l'approche de résolution, on propose de la comparer avec une des approches proposées dans la revue de littérature, et qui s'intéresse aussi aux mêmes aspects traités par notre approche de positionnement des capteurs en l'occurrence la couverture et la connectivité. Aussi, on peut engendrer d'autres bornes inférieures plus raffinées (relâcher progressivement les contraintes de connectivité et de routage) et comparer ensuite les résultats avec ceux obtenus avec l'algorithme de recherche avec tabous diversifiée.

## 5.3 Directions pour les recherches futures

Les travaux futurs peuvent améliorer le modèle introduit dans ce travail et comme cela a été éclairé en partie au niveau des limitations par :

- élaborer d'autres modèles que l'on pourra qualifier de plus « réalistes » pour la propagation radio en incluant les interférences et aussi en prenant en considération les hauteurs et directions des antennes aussi la direction de la propagation de l'émetteur et la variation de la calibration des différents modules des capteurs spécialement du module de l'alimentation.

- inclure des contraintes pour la gestion des ressources énergétiques des capteurs et planifier des périodes de marche, de veille ou encore d'hors tension pour renforcer la fiabilité de ces réseaux.
- inclure la mobilité des capteurs (si on installe un module pour la mobilité) en introduisant des contraintes temporelles pour les mouvements aléatoires des mobiles.



## BIBLIOGRAPHIE

Aarts, E., & Lenstra, J. K. (2003). *Local search in combinatorial optimization*. New Jersey: Princeton University Press. Consulté le 15 janvier 2009, tiré de Google Livres: <http://books.google.fr/>

Ahmed, N., Kanhere, S. S. & Jha, S. (2005). The Holes problem in wireless sensor networks: a survey. *Mobile Computing and Communications Review*, 9(2), 4-18. Consulté le 6 juillet 2007, tiré de <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1072989.1072992>

Aitsaadi, N., Achir, N., Boussetta, K. & Pujolle, G. (2007). A Tabu search approach for differentiated sensor network deployment. *5<sup>th</sup> IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, (pp. 163-167). Piscataway, NJ, USA: IEEE.

Akkaya, K., Younis, M. & Youssef, W. (2007). Positioning of base stations in wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 45(4), 96-102.

Akyildiz, I. F. & Kasimoglu, I. H. (2004). Wireless sensor and actor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 2(4), 351-367.

Akyildiz, I. F., Su, W., Saubramaniam, Y. S. & Cayirci, E. (2002). A survey of sensor networks. *IEEE Communications Magazine*. Consulté le 28 juin 2007, tiré de [http://www.cs.colorado.edu/~rhan/CSCI\\_7143\\_001\\_Fall\\_2002/Papers/Akyildiz2002\\_SurveySensorNets\\_01024422.pdf](http://www.cs.colorado.edu/~rhan/CSCI_7143_001_Fall_2002/Papers/Akyildiz2002_SurveySensorNets_01024422.pdf)

Alaiwy, M. H., Alaiwy, F.H & Habib, S. (2007). Optimization of actors placement within wireless sensor-actor networks. *Proceedings of 12<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Computers and Communications*, (pp. 179-184). USA: IEEE.

Armes, J. (2007). *Propagation and coverage in Automatic Metering Infrastructure (AMI) systems*. (White Paper n 7-801). Consulté le 26 juillet 2009, tiré de <http://www.micronetcom.com/assets/Micronet%20AMI%20White%20Paper.pdf>

Bai, X., Kumar, S., Xuan, D., Yun, Z. & Lai, T.H. (2006). Deploying wireless sensors to achieve both coverage and connectivity. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, (pp.131-142). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery.

Benahmed, K. (2006). La sécurité dans les réseaux de capteurs sans fils. Consulté le 13 juin 2007, tiré de [http://share.esi.dz/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=84&Itemid=1](http://share.esi.dz/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=84&Itemid=1), 2006

Biagioni, E. S., & Sasaki, G. (2003). Wireless sensor placement for reliable and efficient data collection. *Proceedings of the 36<sup>th</sup> Annual Hawaii International Conference on Systems Sciences*, (10 pp.-). Los Alamitos, CA, USA: IEEE. Consulté le 25 août 2009, tiré de <http://www.computer.org/portal/web/csdl/doi/10.1109/HICSS.2003.1174290>

Bluetooth SIG (2010). Consulté le 18 août 2008, tiré de [www.bluetooth.org/](http://www.bluetooth.org/)

Busnel, Y. (2006). Systèmes d'informations pair-à-pair pour les réseaux de capteurs larges échelles. *La lettre scientifique de la fondation Michel Métivier*, (5). Consulté le 16 juin 2008, tiré de <http://metivier.irisa.fr/Lettres/LettreScientifiqueOctobre2006.pdf>

- Caccamo, M., Zhang, L. Y., Sha, L. & Buttazzo, G. (2002). An implicit prioritized access protocol for wireless sensor networks. *IEEE Real-Time System Symposium*, (pp. 39-48). IEEE.
- Chakrabarty, K., Iyengar, S. S., Qi, H. & Cho, E. (2002). Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks. *IEEE Transactions on Computers*, 51(12), 1448-1453.
- Chaudhry, S., Hung, V. & Guha, R. (2006). Optimal placement of wireless sensor nodes with fault tolerance and minimal energy consumption. *IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*, (pp. 610-615). USA: IEEE.
- Cheekarila, S. & Engels, D. W. (2005). A functional taxonomy of wireless sensor networks devices. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Broadband Networks*, (pp. 26-33). USA: IEEE.
- Chen, Y., Chuah, C. & Zhao, Q. (2005). Sensor placement for maximizing lifetime per unit cost in wireless sensor networks. *Proceedings of IEEE Military Communications Conference*, (vol. 2, pp. 1097-1102). USA: IEEE.
- Cheng, P., Chuah, C. & Liu, X. (2004). Energy-aware node placement in wireless sensor networks. *IEEE Global Telecommunications Conference*, (vol. 5, pp. 3210-3214). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Delaët, S., Mandal, P. S., Rokicki, M. A. & Tixeuil, S. (2008). Deterministic secure positioning in wireless sensor networks. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, (vol. 5067 LNCS, pp. 469-477). Berlin, Germany: Springer-Verlag.

- Dhillon, S. S. & Chakrabarty, K. (2003). Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks. *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, (vol.3, pp. 1609-1614). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Département américain de l'énergie (2007). *Wireless temperature sensors for improved HVAC control: an assessment of wireless sensor technology*. Département américain de l'énergie. Consulté le 14 mai 2009, tiré de <http://www.eere.energy.gov/femp/>
- Ding, E., Wang, C., & Zhou, Q. (2007). Wireless model and deployment of sensor networks in the mine. *Proceedings of the 2007 International Conference on Information Acquisition*, (pp. 538-542). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Fan, Y., Zhang, X., Duan, S. & Wang, D. (2006). Energy consumption distribution-aware node placement in wireless sensor networks. *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, (4 pp.). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Farahani, S. (2008). *ZigBee wireless networks and transceivers*. USA: Newnes. Consulté le 15 janvier 2009, tiré de Google Livres: <http://books.google.fr/>
- Frye, L., Cheng, L., Du, S. & Bigrigg, M. W. (2006). Topology maintenance of wireless sensor networks in node failure-prone environments. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, (pp. 886-891). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Fujito, T. & Kurahashi, H. (2006). A Better-Than-Greedy algorithm for k-set multicover. *3<sup>rd</sup> International Workshop on Approximation and Online Algorithms*, (3879 LNCS, pp. 176–189). Berlin, Germany: Springer-Verlag.

- Gorce, J. (2007). *Contribution à la modélisation et l'optimisation des systèmes radio ambiants en réseau* (Habilitation à Diriger des Recherches, Université Claude Bernard Lyon I, INSA Lyon, FRANCE). Consulté le 15 janvier 2009, tiré de <http://perso.citi.insa-lyon.fr/jmgorce/recherche/publications/Manuscrit15nov.pdf>
- Habbani, A., Romain, O., El Abbadi, J. & Garda P. (2006). Réseaux de capteurs: système d'acquisition et de routage d'information. *Revue e-TI : la revue électronique des technologies d'information*, (2). Consulté le 26 juin 2007, tiré de <http://www.revue-eti.netdocument.php?id=828>, 2006.
- Hale, T. S. & Moberg, C. R. (2003). Location science research: a review. *Annals of Operations Research*, (vol. 123, pp. 21-35). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Handziski, V., Köpke, A., Karl, H. & Wolisz, A. (2003). A common wireless sensor network architecture? *Proceedings 1.GI/TG Fachgesprach "Sensometze" (technical report TKN-03-012 of the telecommunications networks Group)*, (pp.10-17). Consulté le 13 février 2008, tiré de [http://www.tkn.tu-berlin.de/publications/papers/sensornetz\\_architecture.pdf](http://www.tkn.tu-berlin.de/publications/papers/sensornetz_architecture.pdf)
- Hirvonen, J., Sallinen, M., Maula, H. & Suojanen, M. (2007). *Sensor networks roadmap*. (VTT Research Notes 2381). Consulté le 12 juin 2008, tiré de <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2381.pdf>
- Hu, W., Chou, C. T., Jha, S. & Bulusu, N. (2006). Deploying long-lived and cost-effective hybrid sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 4(6), 749-767.

IEEE Inc. (2005). *IEEE. std 802.15.1, Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. Consulté le 11 juin 2009, tiré de IEEE Xplore.

IEEE Inc. (2005). *IEEE std 802.15.3, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. Consulté le 11 juin 2009, tiré de IEEE Xplore.

IEEE Inc. (2005). *IEEE std 802.15.4, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. Consulté le 11 juin 2009, tiré de IEEE Xplore.

Ishizuka, M. & Aida, M. (2005). Achieving power-law placement in wireless sensor networks. *Proceedings of International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*, (pp. 661-666). IEEE.

Jain, E., & Liang, Q. (2005). Sensor placement and lifetime of wireless sensor networks: theory and performance analysis. *IEEE Global Telecommunications Conference*, (vol. 1, pp. 173-177). IEEE.

Janaswamy, R. (2001). *Radiowave propagation and smart antennas for Wireless Communications*. USA: Kluwer Academic Publishers. Consulté le 15 janvier 2009, tiré de Google Livres: <http://books.google.fr/>

Karl, H. & Willig, A. (2005). *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. ENGLAND: John Wiley and Sons. Consulté le 15 janvier 2009, tiré de Google Livres: <http://books.google.fr/>

Karp, R. M. (1972). Reducibility among combinatorial problems. *Complexity of Computer Computations* (pp.85-103). New York: Plenum Press. Consulté le 15 janvier 2009, tiré de <http://libeccio.dia.unisa.it/ASDII/2004/karp.pdf>

Martin, G. (2004). *An evaluation of Ad-hoc routing protocols for wireless sensor networks*. Newcastle University. Consulté le 18 août 2009, tiré de <http://research.cs.ncl.ac.uk/astra/Dissertation.pdf>

Mhatre, V. P., Rosenberg, C., Kofman, D., Mazumdar, R. & Shroff, N. (2005). A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 4(1), 4-14.

Rajagopalan, R., Ruixin, N., Mohan, C. K., Varshney, P. K. & Drozd, A. L. (2007). Sensor placement for ballistic missile localization using evolutionary algorithms. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, (pp. 284-289). USA: IEEE.

See, C.H., Abd-Alhameed, R.A.; Hu, Y.F., Horoshenkov, K.V. (2008). Wireless sensor transmission range measurement within the ground level. *2008 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, (pp. 225-228). USA: IEEE.

Seybold, J. (2005). *Introduction to RF propagation*. USA: John Wiley and Sons. Consulté le 15 janvier 2009, tiré de Google Livres: <http://books.google.fr/>

Sohraby, K., Minoli, D. & Znati, T. F. (2007). *Wireless sensor networks*. USA: John Wiley and Sons. Consulté le 6 juin 2006, Consulté le 15 janvier 2009, tiré de Google Livres: <http://books.google.fr/>

Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N. B. & Heinzelman, W. (2002). A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review archive*, 6(2), 28–36.

TinyOS (2010). Consulté le 18 août 2008, tiré de <http://www.tinyos.net/>

Türkogullari, Y. B., Aras, N. I., Altinel, K. & Ersoy, C. (2007). Optimal placement and activity scheduling to maximize coverage lifetime in wireless sensor networks. *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Symposium on Computer and Information Sciences*, (pp.275-280). USA: IEEE.

Union internationale des télécommunications (2010). Consulté le 18 août 2008, tiré de <http://www.itu.int>.

Urrutia, J. (2002). Art gallery and illumination problems. In J.-R. Sack et J. Urrutia (éd.), *Handbook of computational geometry* (pp. 973-1027). Pays-Bas: Elsevier. Consulté le 12 mai 2009, tiré de Google Livres: <http://books.google.fr/>

Vazirani, V. V. (2001). *Approximation algorithms*. Allemagne: Springer Verlag. Consulté le 15 janvier 2009, tiré de Google Livres: <http://books.google.fr/>

Wang, Q., Xu, K., Hassanein, H. & Takahara, G. (2005). Minimum Cost Guaranteed Lifetime Design for Heterogeneous Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the 2005 IEEE International Performance, Computing and Communications Conference*, (pp.599-604). USA: IEEE.



- Wang, Q., Xu, K., Takahara, G. & Hassanein, H. (2005). Locally optimal relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks. *IEEE Global Telecommunications Conference*, (vol. 6, pp. 3549-3553). USA: IEEE.
- Wang, X., Xing, G., Zhang, Y., Lu, C., Pless, R. & Gill, C. (2003). Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. *Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, (pp. 28-39). Association for Computing Machinery.
- Wang, Y., Hu, C. & Tseng, Y. (2008). Efficient placement and dispatch of sensors in a wireless sensor network. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(2), pp. 262-274.
- Wu, Q., Rao, N. S. V., Du, X., Iyengar, S. S. & Vaishnavi, V. K. (2007). On efficient deployment of sensors on planar grid. *Computer Communications*, 30(14-15), pp. 2721-2734.
- Xiaochun, X. & Sahni, S. (2007). Approximation algorithms for sensor deployment. *IEEE Transactions on Computers*, 56(12), pp.1681-1695.
- Xu, K., Wang, Q., Hassanein, H. & Takahara, G. (2005). Optimal Wireless Sensor Networks (WSNs) deployment: minimum cost with lifetime constraint. *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, (vol. 3, pp. 454-461). IEEE.
- Yildirim, K. S., Kalayci, T.E. & Ugur, A. (2008). Optimizing coverage in a K-covered and connected sensor network using genetic algorithms. *9<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Evolutionary Computing*, (pp. 21-26). Grèce: WSEAS Press.

Yu, Y., Prasanna, V. K. & Krishnamachari, B. (2006). *Information processing and routing in wireless sensor networks*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Consulté le 15 janvier 2009, tiré de Google Livres: <http://books.google.fr/>

Zhang, H. & Hou, J. C. (2003). Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 1(1-2), pp. 89–124. Consulté le 6 juin 2009, tiré de <http://www.oldcitypublishing.com/AHSWN/AHSWN1.1-2fulltext/Zhang.pdf>

ZigBee Alliance (2010). Consulté le 18 août 2008, tiré de [www.ZigBee.org/](http://www.ZigBee.org/)

## **ANNEXE: LE STANDARD 802.15.4**

### **A.1 Introduction**

Tandis que la norme IEEE 802.11 a été créée pour résoudre les problèmes de débits de 2 à 11 Mbps pour des communications de longue distance (100m), les WPAN se sont concentrés sur les espaces autour de l'utilisateur ne dépassant pas un rayon de 10 m. Ils permettent des réseaux de coût minimal, avec une consommation énergétique réduite. Le groupe IEEE 802.15 a été créé pour étudier le standard WPAN (Wireless Personal Area Network). Ce groupe a défini trois classes de réseaux WPAN distinguées par le débit, les ressources énergétiques et la qualité de service offerts :

- WPAN à haut débit (IEEE 802.15.3) permet des applications multimédia exigeantes en matière de qualité de service.
- WPAN à débit moyen (IEEE 802.15.1/Bluetooth) permet des applications allant des communications cellulaires jusqu'à aux communications PDA avec une qualité de service orientée vers les applications de voix.
- WPAN à faible débit (IEEE 802.15.4/LR-WPAN : Low-Rate Wireless Personal Area Network) cible des applications industrielles, résidentielles et médicales avec une relaxation sur les contraintes de débit et de qualité de service mais avec des contraintes temporelles et énergétiques sévères.

De là est né le groupe de travail 802.15.4 pour développer un standard de réseaux moins complexes, à coût réduit et à faible consommation énergétique pour des connectivités sans fil à faible débit destiné à des composants bon marché, portables et mobiles. Ce groupe a défini les caractéristiques de la couche physique et de la couche liaison. En parallèle, les utilisateurs de ces technologies regroupés dans l'Alliance ZigBee ont concentré leurs attentions sur la définition des profils applicatifs.

## **A.2 Les composantes**

Un système ZigBee est composé de plusieurs éléments qui peuvent être soit des FFD (Full-Function Device) entités complètes ou RFD (Reduced-Function Device) entités à fonctionnalités réduites. Un réseau de capteur doit avoir un élément FFD qui fonctionnera comme un coordinateur PAN (Personal Area Network). Un élément de type FFD peut fonctionner soit en tant que coordinateur PAN, coordinateur ou un nœud normal. Les nœuds de type RFD peuvent constituer des réseaux simples avec un débit très réduit.

### **A.2.1 Topologie réseau**

Le standard 802.15.4 permet aux dispositifs d'être auto-organisés et auto-maintenus. Il supporte plusieurs topologies de réseaux telles que l'étoile, le point à point ou encore la topologie en clusters.

### **A.2.2 Topologie étoile**

Dans ce type de configuration, la communication est établie entre les nœuds et le nœud central qu'on appelle le coordinateur PAN (Personal Area Network). Ce type de configuration supporte des applications de type domotique, périphériques d'ordinateurs etc. Une fois activé, un FFD peut établir son propre réseau et en devenir le coordinateur. Chaque réseau avec une topologie étoile choisit un identifiant autre que ceux utilisés pour les réseaux qui se trouvent dans son rayon radio d'opération.

### **A.2.3 Topologie point à point**

Dans ce type de topologie, il y a un coordinateur PAN mais à la différence de la topologie étoile, les dispositifs peuvent communiquer entre eux du moment qu'ils reçoivent le signal. Des applications de type contrôle de production industrielle peut bénéficier de ce type de topologie. Le routage se fait en multi-sauts.

#### **A.2.4 Topologie en arbre de clusters**

Ce type de topologie est un réseau de type point à point composé majoritairement de nœuds de type FFD et où un nœud RFD peut se connecter à l'arbre en clusters comme étant un nœud-feuille à l'extrémité d'une branche. N'importe quel FFD peut fonctionner comme un coordinateur et doit assurer la synchronisation des services pour les autres nœuds et les autres coordinateurs. Par contre un de ses coordinateurs peut servir de coordinateur PAN. Ce dernier forme le premier cluster d'identifiant égal à zéro (CID : Cluster IDentifier) en se définissant comme étant la tête du cluster (CLH : CLuster Head) et en choisissant aussi un nouveau identifiant PAN. Ensuite, le coordinateur envoie une trame de balisage aux nœuds voisins. Un nœud candidat qui reçoit cette trame peut demander de rejoindre le réseau. Si le coordinateur PAN accepte la demande, il met à jour sa liste de voisins en l'ajoutant comme un nœud enfant. Ce dernier ajoute aussi le CLH à sa liste de voisinage et commence à envoyer des trames de balisage périodiques de telle manière que chaque nœud candidat puisse rejoindre le réseau et puisse être attaché à lui. Dans certaines conditions, le coordinateur PAN peut sélectionner un nœud pour opérer comme étant un CLH d'un nouveau cluster adjacent.

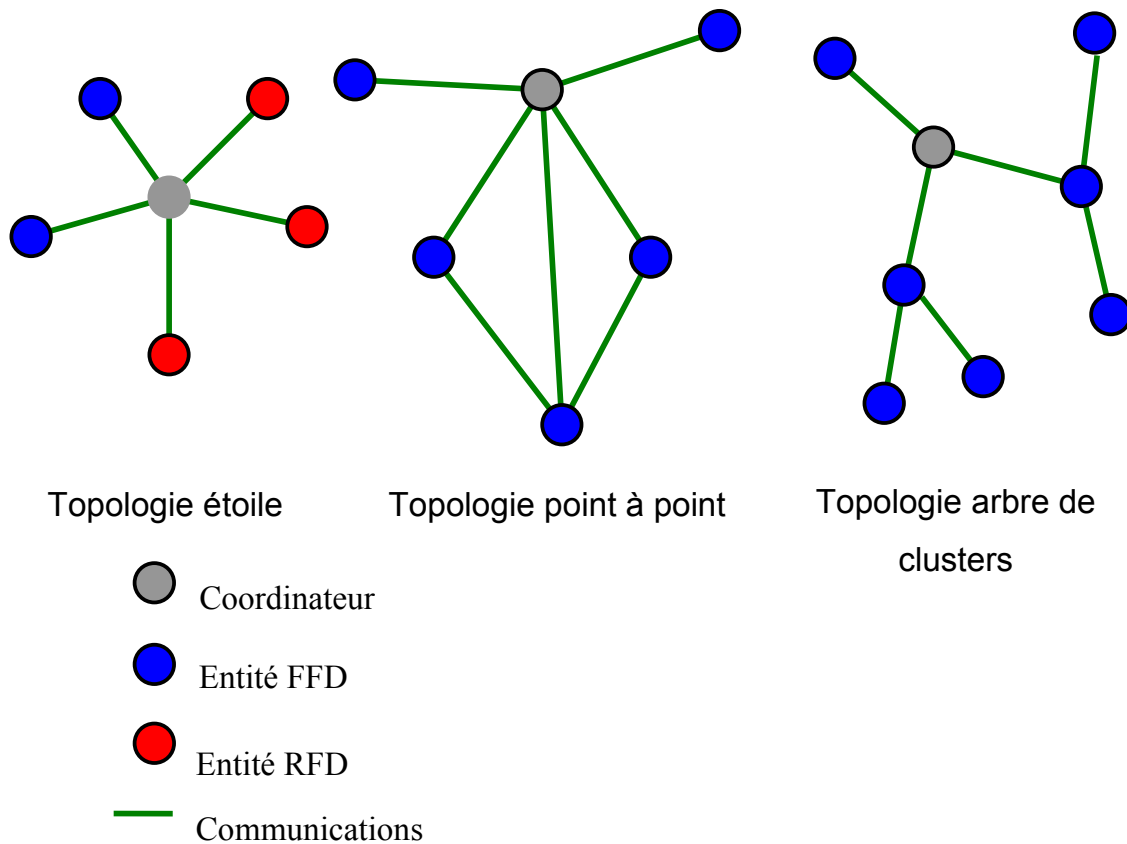


Figure A.1 : Topologies de réseau proposées par IEEE 802.15.4 et ZigBee

### A.3 La couche physique

La version 2003 de L'IEEE 802.15.4 spécifie deux types de couche physique qui sont basés sur des méthodes d'étalement de spectre à séquence directe (DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum) et qu'on différencie par :

- la bande de fréquence :
  - la couche physique 2,4 GHz spécifie un fonctionnement dans la bande ISM (Industrial Scientific Medical) à 2,4 GHz, laquelle est presque mondialement disponible et offre des avantages en terme de coûts de fabrication.
  - la couche physique 868/915 MHz spécifie un fonctionnement dans la bande des 868

MHz en Europe et la bande ISM 915 MHz aux États-Unis. D'autre part, Les bandes 868 MHz et 915 MHz offrent une alternative intéressante aux problèmes d'interférences associées à la bande de 2,4 GHz.

- le débit :
  - la couche physique 2,4 GHz fournit un taux de transfert de 250 Kb/s. Il s'agit d'atteindre des débits élevés, une faible latence, et un faible rapport cyclique.
  - la couche physique 868/915 MHz offre un taux de 20 Kb/s et 40 Kb/s pour améliorer la sensibilité et augmenter la surface à couvrir.
- la sensibilité des récepteurs :
  - -85 dBm pour la bande 2,4 GHz
  - -92 dBm pour les bandes 868/915 MHz.

Dans l'objectif de permettre une large gamme d'applications, la révision de 2006 a amélioré le débit des bandes 868/915 MHz pour supporter 100 et 200 Kb/s. Elle a aussi défini quatre types de couches physiques suivant le type de la modulation utilisé. Trois types conservent l'approche DSSS : BPSK (Binary Phase Shift Keying) ou OQPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) pour les bandes 868/915 MHz et OQPSK pour la bande 2450 MHz). Le quatrième type utilise une combinaison de modulation binaire et de modulation d'amplitude (Amplitude Shift Keying) pour la couche physique 868/915 MHz.

En plus des trois bandes, le groupe IEEE802.15.4c étudie la réglementation de l'utilisation des bandes 314 MHz-316 MHz, 430 MHz -434 MHz, et des bandes 779 MHz-787 MHz en Chine. Quant au groupe IEEE 802.15 4d, il a défini un amendement de la version 2006 du standard pour supporter la bande 950 MHz-956 MHz au Japon.

En août 2007, IEEE 802.15.4a étend les quatre types de couches physiques à six couches physiques en incluant un type de couche physique utilisant une modulation Direct Sequence Ultra

WideBand (DS-UWB) pour les bandes 3 GHz-5 GHz et 6 GHz-10 GHz. Le deuxième type utilise une modulation Chirp Spread Spectrum (CSS) pour la bande ISM 2450 MHz.

### **A.3.1 Canalisation**

Plusieurs canaux de fréquences sont disponibles pour les trois bandes comme suit :

- la couche physique pour les bandes 968/915 MHz supporte un seul canal entre 868,0 MHz et 868,6 MHz,
- 30 canaux (étendu en 2006) entre les bandes 902 et 928 MHz.
- la couche physique pour la bande 2,4 GHz comporte 16 canaux entre 2,4 GHz et 2,4835 GHz avec de larges espaces entre chaque canal (5 MHz) visant à avoir un filtrage d'émission et de réception plus simple.

### **A.3.2 Structure d'un paquet de la couche physique**

La structure d'un paquet de la couche physique ou unité de données de protocole physique (PPDU : PHY Protocol Data Unit) est composée de :

- un entête de synchronisation qui contient un préambule et un délimiteur de début de paquet. Le préambule sur 32 bits a pour rôle l'acquisition de symboles et le chronométrage des jetons (chip timing). Il peut être utilisé aussi pour ajuster la fréquence.
- un entête PHY sur 8 bits pour indiquer la longueur du paquet. On peut spécifier la longueur des données utiles en octets.
- données utiles, ou une unité de données de service PHY (PSDU : PHY Service Data Unit) et dont la taille ne doit pas dépasser 127 octets.

La durée maximale d'un paquet de la couche physique est de l'ordre de :

- 53,2 ms pour la bande 868 MHz,
- 26,6 ms pour la bande 915 MHz et
- 4,25 ms pour la bande 2,4 GHz.



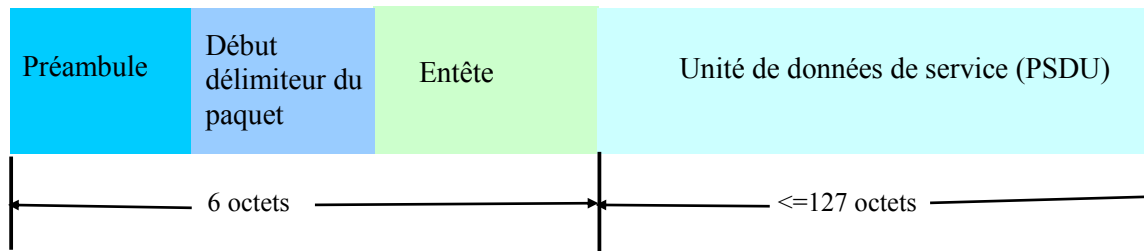


Figure A.2 : Structure d'un paquet de la couche physique de l'IEEE 802.15.4

### A.3.3 Types de modulation

On distingue différents types de modulation comme suit :

- La couche physique pour la bande 868/915 MHz PHY utilise une approche DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum RF transceiver) dans laquelle chaque bit transmis est représenté par une séquence d'une longueur maximale de 15 chips, ensuite, la donnée binaire est modulée sur la porteuse en utilisant une modulation à déplacement de phase binaire (BPSK). Un encodage différentiel des données est utilisé avant la modulation pour permettre une réception cohérente différentielle peu complexe.
- La couche physique pour la bande 2,4 GHz utilise une technique de modulation quasi orthogonale (16-array) basée sur la méthode DSSS. Les données binaires sont groupées en symboles et sont modulés sur une porteuse en utilisant une modulation à déplacement minimum (MSK : Minimum Shift Keying), qui est proche de la modulation de phase en quadrature compensée (OQPSK).

Tableau A.1 : Paramètres de modulation du signal de l'IEEE 802.15.4

Couche physique	Bande de fréquence MHz	Paramètres de données			Paramètres d'étalement de spectre	
		Débit Kbit/s	Débit symboles Kbaud	Modulation	Débit chips Kchip/s	Modulation
<b>868-915 MHz</b>	868-868,6	20	20	BPSK	300	BPSK
	902-928	40	40	BPSK	600	BPSK
<b>2,4 GHz</b>	2400-2483,5	250	62,5	16-ary orthogonal	2000	OQPSK

### A.3.4 Caractéristiques de la couche physique

On présente ici quelques caractéristiques de la couche physique :

- activation ou désactivation de l'antenne de l'émetteur. L'antenne fonctionne selon 3 modes : émission, réception ou libre. Le standard recommande que le passage du mode réception au mode transmission et vice versa, ne dépasse pas 12 périodes-symbole
- détection de la puissance (ED : receiver Energy Detection). C'est un indicateur utilisé au niveau de la couche réseau pour sélectionner le canal de transmission. Il s'agit de l'estimation de la puissance reçue avec un canal de transmission de l'IEEE 802.14.5. Le résultat de l'ED est exprimé sous forme d'un entier sur 8 bits. La valeur minimale (qui est égale à 0) indique une valeur inférieure de 10dBm par rapport à la sensibilité du récepteur spécifiée.
- indicateur de qualité du lien de transmission (LQI : Link Quality Indication). La valeur de cet indicateur est insérée dans le paquet de la couche physique et permet de renseigner la force et ou la qualité du paquet reçu. Cet indicateur peut être implémenté avec l'ED du récepteur ou encore par une estimation du rapport signal bruit, ou en combinat les deux méthodes. Le LQI est représenté par un nombre entier qui doit être ventilé uniformément entre les valeurs minimales et maximales. Ces dernières sont associées respectivement

avec la plus petite et la plus grande qualité du signal IEEE802.15.4 détectable par le récepteur.

- contrôle du canal (CCA : Clear Channel Assessment). Permet de connaître si le canal est libre ou occupé. Cet indicateur est calculé suivant au moins l'une des trois méthodes :
  - puissance dépassant le seuil (energy above threshold) : cet indicateur doit indiquer que le média de transmission est occupé si le signal reçu est supérieur à un certain seuil ED.
  - mode de détection de l'onde porteuse (Carrier Sense mode). La procédure indique que le média est occupé si la puissance du signal reçu avec la modulation et la technique d'étalement de spectre de l'IEEE 802.15.4 et qui peut être supérieur ou inférieur au seuil ED.
  - mode de détection de l'onde porteuse avec détection de la puissance ou (Carrier Sense with Energy Detection mode) : une combinaison des modes précédents, et qui consiste à indiquer que le média de transmission est occupé si la puissance du signal reçu avec la modulation de l'IEEE802.14.5 est supérieure au seuil ED.
- sélection du canal de fréquence : un réseau peut choisir d'opérer dans un ensemble de canaux. Cependant la couche physique doit ajuster l'émetteur pour opérer dans un canal spécifique si elle reçoit une demande de réajustement des couches supérieures.

#### **A.4 La couche liaison de données**

La couche DLL (Data Link Layer) est décomposée en deux sous-couches :

- sous couche de contrôle de lien logique (LLC : Logical link Control) qui est standardisée dans 802.2.
- sous couche de contrôle d'accès au médium (MAC : Medium Access Control) qui fournit des services à la sous-couche LLC IEEE 802.2 de type 1 à travers une sous-couche convergence de service spécifique (SSCS : Service-Specific Convergence Sublayer). Par

contre une LLC propriétaire peut accéder directement aux services MAC sans passer au travers d'une SSCS. La SSCS assure la compatibilité entre différentes sous-couches LLC supportant ainsi des topologies réseau plus complexes. La sous-couche MAC fournit deux services aux couches supérieures :

- service de données MAC qui est accessible à travers une partie d'une sous-couche commune MAC (MCSP-SAP : MAC Common Part Sublayer),
- service de gestion MAC qui est accessible à travers une entité de gestion de la couche MAC (MLME-SAP : MAC Layer Management Entity). Le service de gestion MAC est composé de 26 primitives pour implémenter l'association, la désassociation, l'accusé de réception etc., la rendant ainsi moins complexe que d'autres standards WPAN.

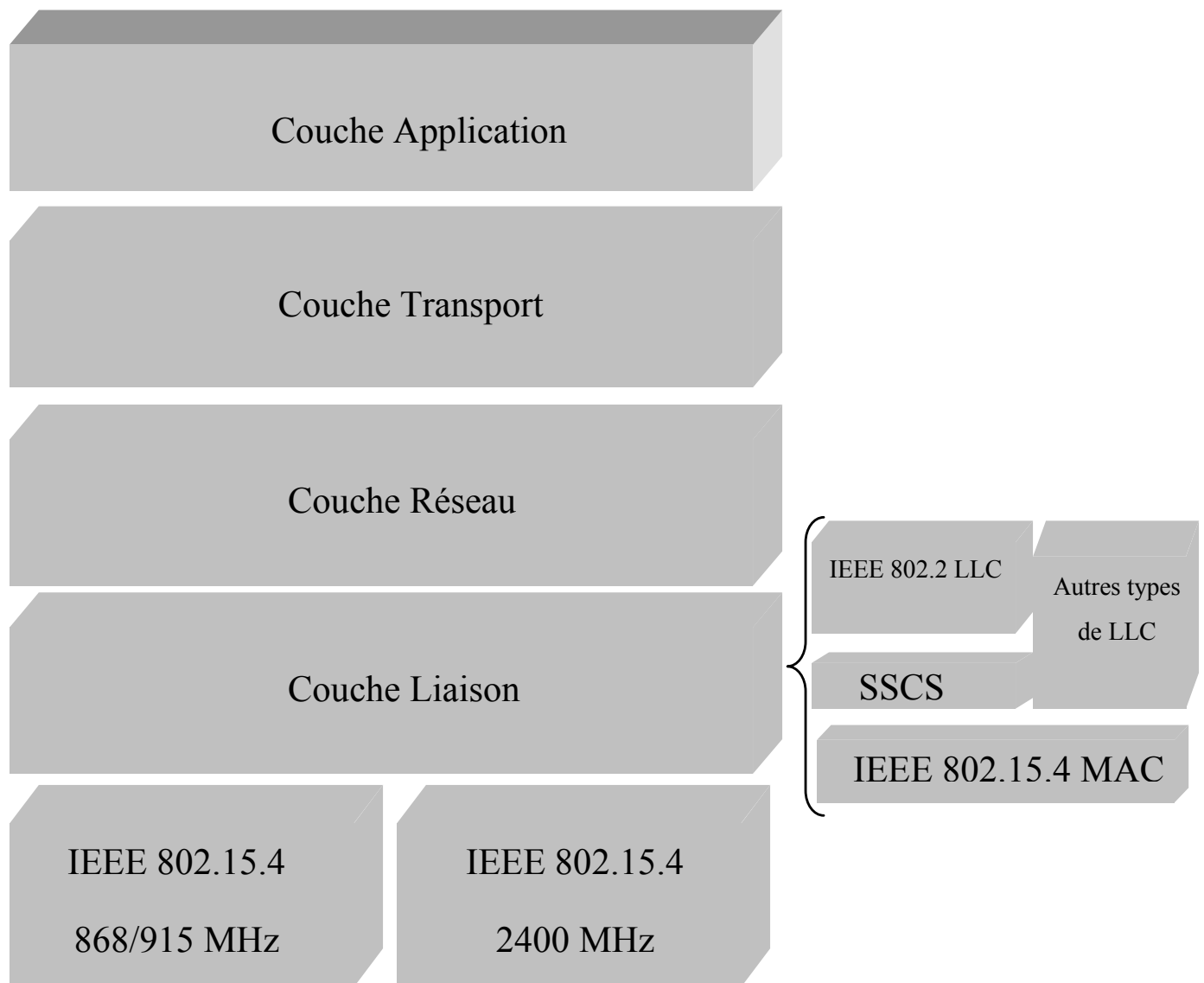


Figure A.3 : Le modèle de l'IEEE 802.15.4

### A.4.1 Format général d'une trame MAC

La trame MAC est composée de :

- entête MAC (MHR : MAC HeadeR) qui comprend :
  - champ de contrôle de trame. : est le champ de contrôle de trame. Il indique le type de trame MAC qui est transmis, spécifie le format du champ adresse et contrôle l'acquittement.
  - numéro de séquence ; est égal à la trame d'acquittement de la transmission précédente.
  - taille du champ adresse peut varier entre 0 et 20 octets.
- unité de données de service MAC (MSDU : MAC Service Data Unit) ou champ de données utiles (payload) est de longueur variable et dépend du type de la trame qui peut être une :
  - trame de données,
  - trame d'acquittement,
  - trame de balisage,
  - trame de commandes MAC.
- pied de page MAC (MFR : MAC FooteR) ou séquence de contrôle de trame (FCS : Frame Check Sequence) qui aide à vérifier l'intégrité de la trame MAC. C'est un contrôle de redondance cyclique (CRC : Cyclic Redundancy Check) sur 16 bits.

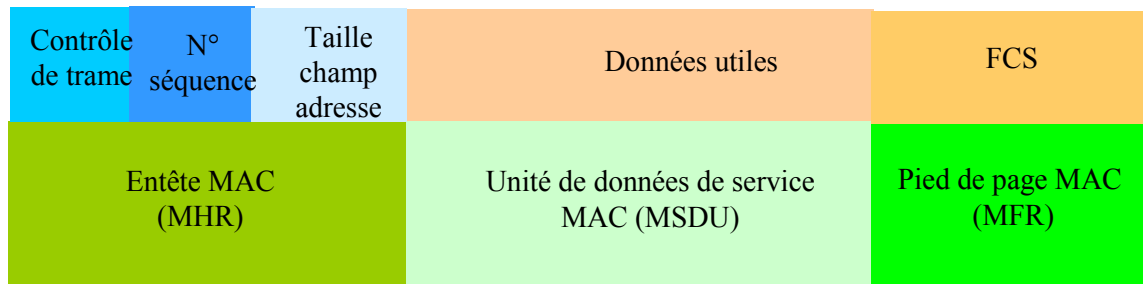


Figure A.4 : Format général de la trame MAC de l'IEEE 802.15.4

### A.4.2 Fonctionnement du protocole de transmission

Un réseau LR-WPAN permet de fonctionner selon deux mécanismes d'accès au canal :

- mode non coordonné : utilisé dans un réseau sans balise (non-beacon slotted). Quand un nœud du réseau veut émettre, il commence par contrôler si un autre élément est en train d'émettre sur le même canal. Si c'est le cas, il peut soit devenir inactif pendant une période aléatoire, ou indiquer une erreur de transmission s'il y a échec après plusieurs tentatives.
- mode coordonné : utilisé lorsque les trames de balisage (beacon) sont validées par des supertrames (beacon slotted) et qui constituent l'espace temporel entre deux trames de balisage. La supertrame est composée d'une portion active (les nœuds peuvent émettre et recevoir) et une portion inactive (les nœuds sont en veille). La portion active est partitionnée en 16 créneaux de temps ou slots temporels égaux. Ce mode propose deux méthodes d'accès au sein de la supertrame :
  - mode avec contention. C'est un mode d'accès toujours possible et qui se fait selon le CSMA-CA classique. Dans ce cas, une partie de la supertrame est lui dédiée et est appelée période d'accès avec contention (CAP : Contention Access Period).
  - mode sans contention. C'est un mode optionnel. L'accès est maîtrisé par le coordinateur PAN qui attribue des slots aux nœuds désirant émettre et que l'on appelle des slots temporels dédiés (GTS : Guaranteed Time Slots). Les GTS optionnels se trouvent vers la fin de la supertrame et que l'on appelle période de libre

contention (CFP : Contention Free Period) et dont la durée dépend des demandes des nœuds du réseau. L'accès au canal est basé sur la contention/négociation et tous les nœuds doivent terminer leurs transactions avant le début de la prochaine période de libre contention. Le début de la période de libre contention et la durée de la supertrame sont communiqués aux nœuds du réseau par le coordinateur PAN.

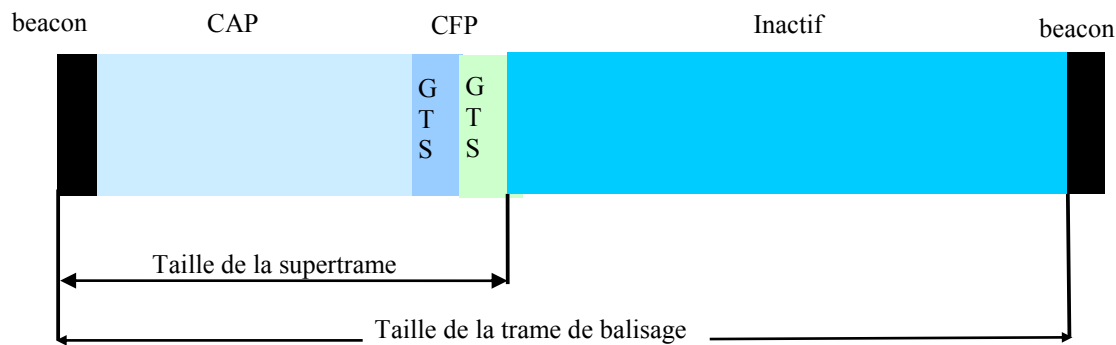


Figure A.5 : Un exemple d'une supertrame

### A.4.3 Caractéristiques de la couche MAC

Les caractéristiques des sous couches MAC sont : construction et maintenance des PANs, génération des trames de balisage, l'association et la désassociation, la synchronisation et la gestion des slots temporels dédiés ou GTS.

### A.4.4 Construction de PANs et leurs évolutions

Un nœud de type FFD intègre un PAN une fois le processus de scan actif du canal ou un scan de type ED est terminé et après la sélection d'un identifiant du PAN. Le scan actif permet de localiser un coordinateur émettant des trames de balisage dans son espace POS (Personal Operating Space). Ce scan est recommandé sur plusieurs canaux. Le nœud doit envoyer d'abord une commande de demande de trame de balisage. Ensuite, le nœud doit se mettre en attente pendant une période de  $aBaseSuperframeDuration * (2n + 1)$  et où  $n$  est compris entre 0 et 14. Durant cette période, le nœud rejette toute trame autre que les trames de balisage. Le processus de scan des canaux se termine si on a atteint un maximum d'identifiants PAN spécifié par le protocole ou si tous les canaux ont été scannés.



Un scan de type détection de puissance (ED receiver Energy Detection) permet au nœud FFD de mesurer le pic de la puissance pour chaque canal. Pour chaque canal, le scan est réalisé durant  $aBaseSuperframeDuration * (2n + 1)$  et où  $n$  est la valeur du paramètre *scanDuration*. Ce scan doit se terminer si les mesures faites sont égales au maximum spécifié par l'implémentation ou encore si les mesures ont été effectuées pour tous les canaux disponibles.

Dans certaines situations, il se peut que deux PAN aient le même POS et aussi le même identifiant. Si c'est le cas, le coordinateur et les nœuds du PAN doivent procéder à la résolution de ce conflit.

#### **A.4.5 Génération des trames de balisage**

Les dispositifs de type FFD peuvent fonctionner en mode sans trame de balisage ou même émettre des trames de balisage en tant que coordinateur PAN ou en tant qu'un nœud associé à un réseau PAN déjà opérationnel.

#### **A.4.6 Association et désassociation**

Un nœud de type FFD peut signaler sa présence dans un PAN (après l'association) aux autres dispositifs en émettant des trames de balisage.

Le processus d'association d'un nœud peut commencer après avoir scanné un canal d'une manière active ou passive. Les deux méthodes permettent de localiser un coordinateur qui est entrain d'émettre des trames de balisage dans son espace POS. Cette opération permet de choisir un PAN convenable. Un nœud doit demander d'intégrer un PAN qui permet l'association. Une fois l'association accomplie, les couches supérieures demandent d'ajuster le canal de transmission.

Un nœud non encore associé à aucun PAN, entame la procédure de l'association en émettant une demande d'association au coordinateur PAN. Si cette requête a été reçue correctement, le coordinateur répond par un acquittement qui ne signifie pas que l'association a été faite. Avant de décider de l'association, le coordinateur doit vérifier si les ressources du PAN permettent l'intégration d'un nouveau nœud. Cette décision doit être faite dans un laps de temps déterminé par le paramètre *aResponseWaitTime*. Si le nœud est déjà associé, on élimine toutes les données.

Si les ressources sont suffisantes, le coordinateur doit allouer une adresse au nœud et envoyer une trame de type « réponse association » en indiquant l'adresse attribuée ainsi que la réussite de l'opération de l'association. S'il n'y a pas assez de ressources, le coordinateur du PAN doit générer aussi une trame de type « réponse association » en indiquant l'échec de l'opération de l'association.

Au même temps, lorsque le nœud reçoit l'acquittement, il attend la réponse pendant *aResponseWaitTime*. À la réception de la réponse de la demande d'association, le nœud doit envoyer un acquittement. Si l'association a réussi, le nœud sauvegarde l'adresse du coordinateur du PAN auquel est associé.

Lorsque le coordinateur veut qu'un nœud quitte le PAN, il envoie une notification de désassociation. Une fois la notification reçue, le nœud doit envoyer un acquittement. Même si l'acquittement n'a pas été reçu, le coordinateur doit considérer que le nœud a été désassocié. Si un nœud demande de quitter le PAN auquel est associé, il doit envoyer une notification de désassociation au coordinateur PAN. Une fois reçue, le coordinateur envoie un acquittement. Même si l'acquittement n'a pas été reçu, le nœud doit se considérer comme n'étant plus associé au PAN en question.

Un nœud associé à un PAN donné doit se désassocier en supprimant toute référence à ce PAN. Un coordinateur PAN doit désassocier un nœud en supprimant aussi toute référence à lui.

#### **A.4.7 Synchronisation**

Dans un PAN où les trames de balisage sont supportées, la synchronisation se fait après la réception et le décodage des trames de balisage. Dans un réseau où les trames de balisage sont supportées, Les nœuds doivent accepter seulement la synchronisation faite avec des trames de balisage qui contiennent l'identifiant PAN spécifié par le paramètre *macPANId*. Pour accepter la synchronisation d'une trame de balisage, un nœud doit chercher pendant une période de  $aBaseSuperframeDuration * (2n + 1)$  où  $n$  est la valeur du paramètre *macBeaconOrder*. Si une trame de balisage du nœud contenant l'identifiant du PAN n'est pas reçue, le processus de recherche doit être répété un nombre de fois égal à *aMaxLostBeacon*. Si ce nombre est atteint,

une notification de perte de synchronisation doit être signalée aux couches supérieures.

Dans un PAN où les trames de balisage ne sont pas supportées, les nœuds doivent élire le coordinateur pour les données. À la réception d'une demande d'élection, la sous couche de gestion MAC procède à l'extraction de données en attente du coordinateur.

#### **A.4.8 Allocation et gestion du GTS**

Le mécanisme GTS permet à un nœud d'opérer en un canal de transmission suivant le temps qui est lui alloué par la supertrame. Un nœud doit essayer de demander et d'utiliser un GTS si seulement s'il est à l'écoute des trames de balisage. Le GTS doit être alloué par le coordinateur PAN et doit être utilisé pour la communication entre le nœud et le coordinateur du PAN. Un seul GTS peut s'étendre sur plusieurs supertrames. Aussi, le coordinateur peut allouer jusqu'à sept GTS à la fois si la supertrame le permet.

Le GTS est alloué sur la base du premier arrivé premier servi et est placé après le CAP et à la fin de la supertrame d'une façon contigüe. Le GTS doit être libéré à n'importe quel moment par le coordinateur ou par le nœud lui-même si ce dernier ne veut plus l'utiliser. La gestion du GTS est du ressort du coordinateur PAN. Pour chaque GTS, le coordinateur PAN doit enregistrer le début du slot, la longueur, la direction et l'adresse du nœud auquel est associé.

Un nœud doit demander l'allocation d'un nouveau GTS à travers la commande « demande de GTS » avec les caractéristiques fournies par les couches supérieures. Lorsque le coordinateur PAN reçoit cette requête, il doit envoyer un acquittement. Le coordinateur vérifie ensuite s'il y a suffisamment de capacité sur la supertrame en se basant sur la taille de la CAP et aussi sur la longueur du GTS demandé. La supertrame a suffisamment de capacité si le nombre maximum de GTS à allouer n'est pas atteint ou encore si l'allocation de ce GTS ne réduit pas la taille de la CAP à moins que la valeur du paramètre *aMinCAPLength*. Lorsque le nœud reçoit l'acquittement du coordinateur, il continue à surveiller les trames de balisage durant *aGTSDescPersistenceTime* supertrames.

Lorsque le coordinateur PAN décide d'allouer un GTS, Il doit générer un descripteur avec les spécifications demandées et l'adresse du nœud qui en a fait la demande et en informe les couches

supérieures. Ce descripteur indique la longueur et le début dans la supertrame. Dans le cas contraire, le début du slot doit être remis à zéro et la longueur doit être remise à la longueur du plus grand GTS permise. Ce descripteur doit être envoyé dans *aGTSPersistenceTime* supertrames. À la réception de la supertrame, le nœud traite ce descripteur et informe les couches supérieures de l'allocation du GTS.

Le nœud qui veut libérer le GTS qui lui a été alloué doit envoyer une commande de type « requête GTS ». Un acquittement est envoyé par le coordinateur et ce dernier doit aussi entamer le processus de libération. Le coordinateur doit s'assurer qu'il n'y a pas d'espaces non occupés dans le CFP.

## **A.5 La couche réseau**

La communication entre les nœuds représente la fonctionnalité la plus importante d'un réseau de capteurs. La conception de la couche réseau doit résoudre les problèmes de la consommation énergétique, ceux d'adressage et de routage afin de garantir de meilleures performances.

### **A.5.1 Routage par inondation**

Dans le cas du routage par inondation, la source diffuse son message aux nœuds voisins et chaque nœud le retransmet à ses voisins sauf la destination. Dans ce type de routage, on a une perte de la bande passante et un gaspillage de ressources énergétiques.

### **A.5.2 Protocoles proactifs**

Dans les protocoles proactifs les routes sont établies à l'avance. On peut citer en exemple les protocoles FSR (Fisheye State Routing) ou OLSR (Optimized Link State Routing).

### **A.5.3 Protocoles réactifs**

Dans les protocoles réactifs, les routes sont établies à la demande. On peut citer par exemple les protocoles DSR (Dynamic Source Routing) et AODV (Ad hoc On demand Distance Vector routing).

### **A.5.4 Protocoles hybrides**

Les protocoles hybrides tirent parti des avantages des protocoles proactifs et réactifs. Un des exemples est le ZRP (Zone Routing Protocol) dont le principe repose sur la gestion de deux zones :

- l'Intrazone Routing Protocol (IARP) : le routage se fait d'une manière proactive,
- l'Interzone Routing Protocol (IERP) : le routage se fait d'une manière réactive.

### **A.5.5 Protocoles dédiés**

Les protocoles de routage doivent tenir en compte des spécificités des réseaux de capteurs telle que la consommation énergétique ou encore la capacité de calcul. Pour ce faire, une partie des recherches sont orientées vers une simplification du découpage en couches protocolaires indépendantes appelée cross layer optimization. On peut citer quelques types de ces protocoles qu'on appelle dédiés :

- protocoles centrés données,
- protocoles temps réel.

### **A.5.6 Protocole SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation)**

Le protocole SPIN est un protocole centré données qui repose sur un modèle de négociation afin de propager l'information et garantir une adaptation aux ressources énergétiques du capteur. Le fonctionnement se fait en trois étapes :

- Lorsqu'un nœud veut partager de nouvelles données, il émet en broadcast une commande de type « ADV » (ADVERTISE) qui comporte une description des données en question.
- Un nœud voisin qui reçoit ce type de message, décide s'il est intéressé par cette donnée en consultant sa base d'intérêts. Si c'est le cas, il envoie une commande « REQ » (REQUEST) au nœud originaire du message « ADV ».

- En recevant la commande «REQ », le nœud envoie les données à partager dans une commande «DATA ».

Le processus est répété par chaque nœud ayant reçu ces données et ainsi chaque nœud du réseau obtient une copie.

### **A.5.7 Protocole SPEED**

Le protocole SPEED est un protocole de routage temps-réel. Le fonctionnement est le suivant. Un message sera envoyé vers un nœud voisin si le temps de parcours est le plus court. Cette information est stockée dans les tables de routage échangées entre les nœuds voisins, et qui contiennent un champ rendant compte du temps nécessaire pour aller à tel ou tel nœud (renseigné à partir de messages test). Dans le cas de congestion, des paquets de rétro information sont envoyés aux nœuds pour maintenir les informations sur les nœuds voisins.